



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

André Filipe Loureiro da Costa

Deteção de Colisões com  
Guardas de Segurança

André Filipe Loureiro da Costa  
Deteção de Colisões com  
Guardas de Segurança

UMinho | 2013

outubro de 2013





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

André Filipe Loureiro da Costa

Deteção de Colisões com  
Guardas de Segurança

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Jorge Cabral

e coorientação do  
Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE AUTORIZAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

# Agradecimentos

As primeiras palavras de agradecimento vão sem dúvida alguma para os meus pais, Armindo Quinteiro Costa e Rosinda Guimarães Loureiro, por todo o apoio e suporte que sempre me deram durante toda a minha vida até ao dia de hoje. Agradeço a minha querida irmã Catherine que sem ela nunca teria chegado aqui.

Aos meus orientadores Professor Doutor Jorge Cabral e professor Doutor Luís Alexandre Rocha, por todo o apoio prestado, pela confiança em mim depositada e por me terem proporcionado a participação neste projeto.

Ao *Embedded Systems Research Group* do Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho, que me acolheu e proporcionou todas as condições necessárias para a elaboração desta tese. Agradeço a todos os membros do grupo, em especial ao Tiago Gomes, pelos ensinamentos e conselhos ao longo do ano.

Aos meus colegas de curso e colegas de casa, os quais em todos estes anos, sempre me deram apoio e ajuda todos os dias, nos maus e bons momentos.

A todos os meus familiares e amigos, em especial agradecimento ao meu tio, Daniel Costa, ao qual devo o interesse desde cedo pela engenharia e aos meus amigos Tiago Dantas, James Oliveira, Cristiana Gonçalves e Patrícia Fernandes, por terem estado sempre presentes no meu percurso académico.

E por fim, dedico esta tese a todos aqueles que sempre acreditaram em mim.

*Citação preferida:*  
*"Quem nunca cometeu um erro,*  
*Nunca tentou algo novo!"*

*Albert Einstein*



# Resumo

Portugal tem uma rede de autoestradas com mais de 3000Km, as quais são frequentadas diariamente por milhares de veículos. As autoestradas permitem viajar mais rapidamente e de uma forma mais segura. Nos últimos tempos tem-se assistido a um esforço progressivo, por parte das empresas concessionárias, no sentido de preservar as infraestruturas rodoviárias das suas concessões, de forma a reduzir custos em ações de manutenção, mas também aumentar a segurança dos automobilistas. Frequentemente também são incluídos novos mecanismos de segurança com o objetivo de minimizar a sinistralidade rodoviária.

No âmbito do projeto *QREN SI I&DT “SustIMS: Sustainable infrastructure Management System”*, em co-promoção com a empresa Ascendi, pretende-se desenvolver um sistema de deteção em tempo real de colisões com as guardas de segurança das autoestradas geridas pela concessionária.

A deteção instantânea de colisões nas guardas de segurança pode permitir minimizar as consequências de uma colisão, a intervenção no auxílio e apoio às vítimas pode ser efetuada mais rapidamente e é também possível alertar, em tempo real, os restantes automobilistas.

O sistema de deteção de colisões descrito nesta tese vem contribuir para um potencial aumento da segurança rodoviária nas autoestradas, permitindo uma vigilância em tempo real em todos os pontos negros da concessão (locais considerados perigosos devido ao número de acidentes com viaturas mortais aí registados).

Palavras-chaves: WSN, modelação em elementos finitos, *SimpliciTI*, Programação em linguagem C/C++.





# Abstract

There are more than 3000 km of highways with the daily passing of millions of vehicles in Portugal. Highways permit the passengers to travel faster and safe. Recently, there have been a large number of ongoing efforts by several companies in order to preserve the road infrastructure to reduce costs for maintenance and also increase the safety of users with various security mechanisms which lead to decrease the accidents.

This work is in partnership of the project QREN SI I&DT "SustIMS: Sustainable infrastructure Management System" with collaboration of Ascendi company. It intends to develop a system for real-time detection of collisions with the security guards of highways.

The instant detection of collisions with guardrails, can allow minimizing the consequences of a collision. Therefore intervention in aid and support to victims can be performed faster in real time and also the other motorists can be informed by the collision prior to arrive.

The main purpose of the collision detection system described in this thesis is to increase the safety on the highways and also allowing a real time monitoring system for the dangerous points (considered as hazardous locations).

Keywords: WSN, Finite Elements Modeling, Simpliciti, C/C++ Language Programming.



# Conteúdo

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO.....	1
1.2	MOTIVAÇÃO .....	1
1.3	OBJETIVOS .....	1
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2.</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1	SISTEMAS DE DETECÇÃO DE COLISÕES .....	5
2.2	MONITORIZAÇÃO DE COLISÕES EM GUARDAS DE SEGURANÇA .....	5
2.3	ACELERÓMETROS.....	18
2.3.1	<i>Tipos de acelerómetros .....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Aplicações.....</i>	<i>21</i>
2.4	SISTEMAS EXISTENTES PARA DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES.....	22
2.5	WIRELESS SENSOR NETWORKS (WSN) .....	23
2.5.1	<i>Aplicações das WSN .....</i>	<i>23</i>
2.6	STANDARD IEEE 802.15.4 .....	24
2.7	STACK SIMPLICITI DA TEXAS INSTRUMENTS .....	24
2.8	RESUMO .....	25
<b>3.</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>27</b>
3.1	REQUISITOS DO SISTEMA .....	27
3.2	VANTAGENS DO SISTEMA PROPOSTO.....	28
3.3	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PROPOSTO.....	29
3.4	TOPOLOGIA DA WSN .....	33
3.5	ESTUDO E SELEÇÃO DOS COMPONENTES .....	35
3.5.1	<i>System-on-Chip (SoC) .....</i>	<i>35</i>
3.5.2	<i>Seleção do acelerómetro.....</i>	<i>36</i>
3.5.3	<i>Bateria.....</i>	<i>37</i>
3.5.4	<i>Caixa de proteção.....</i>	<i>37</i>
3.6	MODELO 2D E 3D DAS GUARDAS DE SEGURANÇA .....	38
3.6.1	<i>Modelo 2D.....</i>	<i>38</i>
3.6.2	<i>Modelo 3D.....</i>	<i>39</i>

3.7	FERRAMENTAS .....	40
3.8	RESUMO .....	40
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....</b>	<b>41</b>
4.1	SIMULAÇÕES DAS COLISÕES ATRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS .....	41
4.1.1	<i>Propriedades físicas do aço galvanizado.....</i>	<i>42</i>
4.1.2	<i>Testes à ferramenta Ansys .....</i>	<i>44</i>
4.1.3	<i>Simulações efetuadas com o modelo 2D.....</i>	<i>51</i>
4.1.4	<i>Simulações efetuadas com o modelo 3D.....</i>	<i>55</i>
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DAS COMUNICAÇÕES .....	58
4.2.1	<i>Topologia de rede.....</i>	<i>58</i>
4.2.2	<i>Protocolo de comunicação .....</i>	<i>60</i>
4.3	HARDWARE DESENVOLVIDO .....	61
4.3.1	<i>Placas de desenvolvimento .....</i>	<i>61</i>
4.3.2	<i>End Device .....</i>	<i>65</i>
4.3.3	<i>Access Point.....</i>	<i>67</i>
4.3.4	<i>CC1110 868MHz.....</i>	<i>69</i>
4.4	SOFTWARE DESENVOLVIDO .....	70
4.4.1	<i>Software que implementa o Access Point da rede .....</i>	<i>70</i>
4.4.2	<i>Software que implementa os nós End device da rede.....</i>	<i>72</i>
4.4.3	<i>Software desenvolvido para desktop .....</i>	<i>75</i>
4.4.4	<i>Website, base de dados e Aplicação Smartphone.....</i>	<i>80</i>
4.5	RESUMO .....	82
<b>5.</b>	<b>AVALIAÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>83</b>
5.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO .....	83
5.2	ANÁLISE DE CONSUMO.....	89
5.3	CUSTOS DO SISTEMA .....	92
5.4	RESUMO .....	93
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO .....</b>	<b>95</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	95
6.2	TRABALHO FUTURO .....	97

# Índice de figuras

Figura 2.1-Arquitetura de camadas proposta pelo sistema [1].....	6
Figura 2.2-Arquitetura do nó de alerta de proximidade e deteção de colisões [1].....	8
Figura 2.3-Protótipo de um nó para deteção de colisões [1] .....	9
Figura 2.4-Testes em laboratório para validação do modelo [1].....	9
Figura 2.5-Arquitetura proposta para monitorização de colisões [3] .....	11
Figura 2.6-Diagrama de funcionamento [3] .....	13
Figura 2.7-Testes no terreno [3] .....	14
Figura 2.8-Demo para teste [3] .....	14
Figura 2.9-Recepção de imagens no interface [3] .....	14
Figura 2.10- Nó do sistema <i>Red-Wine</i> .....	17
Figura 2.11- Mapa das instalações do sistema <i>Red-Wine</i> .....	17
Figura 2.12-Sistema massa-mola básico [4] .....	19
Figura 2.13-Representação da massa de um acelerómetro suspenso por suportes fixos [6] .....	20
Figura 2.14-Sensores MEMS presentes nos automóveis da atualidade [4] .....	21
Figura 2.15-Aplicação dos acelerómetros na atualidade [5] .....	22
Figura 2.16-Comparação dos vários <i>standards</i> de redes sem fios [9] .....	24
Figura 2.17-Tipos de topologias para WSN [11] .....	25
Figura 2.18: Comparação entre os vários tipos de tecnologias sem fios.....	25
Figura 3.1-Diagrama de <i>Deployment</i> do sistema.....	30
Figura 3.2-Diagrama Use-Case do sistema .....	31
Figura 3.3-Diagrama sequencial de funcionamento geral do sistema .....	33
Figura 3.4-Ilustração da topologia em estrela aplicada ao problema .....	34
Figura 3.5-Diagrama sequencial do funcionamento da WSN .....	34

Figura 3.6 SoC CC2530 da <i>Texas Instruments</i> no <i>package</i> QFN40 .....	35
Figura 3.7- Bateria LS17500 (Li-SOCl <sub>2</sub> ) da <i>Soft Batteries</i> .....	37
Figura 3.8- Caixas selecionadas para proteção dos nós .....	38
Figura 3.9-CAD do modelo 2D das Guardas de segurança .....	39
Figura 3.10-CAD do modelo 3D das Guardas de segurança .....	39
Figura 4.1- Rayleigh Damping .....	44
Figura 4.2-CAD em 3D da massa suspensa por molas .....	45
Figura 4.3-Mesh criada para o modelo massa suspensa por molas .....	46
Figura 4.4- Aplicação de uma força na face inferior da massa suspensa .....	47
Figura 4.5- Representação do modelo na ferramenta Ansys .....	48
Figura 4.6-Gráfico da oscilação da massa suspensa .....	48
Figura 4.7-CAD em 3D de uma viga retangular .....	49
Figura 4.8-Representação da viga na ferramenta Ansys .....	50
Figura 4.9- Gráfico da oscilação da viga .....	51
Figura 4.10-Mesh criada para o modelo 2D .....	51
Figura 4.11-Teste em guarda de segurança de betão [8] .....	52
Figura 4.12-Teste em guarda de segurança metálico [8] .....	52
Figura 4.13-Interface gráfico do Ansys .....	54
Figura 4.14-Dados da simulação ao longo do tempo após a colisão .....	54
Figura 4.15-Gráfico de propagação da onda de choque na guarda de segurança .....	55
Figura 4.16-Mesh criada para o modelo 3D .....	56
Figura 4.17-Representação gráfica do Modelo 3D no Ansys .....	56
Figura 4.18-Diagrama sequencial de comunicação ponto a ponto .....	59
Figura 4.19-Formato da trama de comunicação da SimpliCI [10] .....	60
Figura 4.20-Estrutura do protocolo de comunicação .....	60
Figura 4.21- <i>CC25xx Development Kit</i> .....	62
Figura 4.22- <i>CC2530 Evaluation Module</i> .....	63
Figura 4.23- <i>Original CC2530 Evaluation Module</i> da <i>Texas Instruments</i> .....	63

Figura 4.24-Ligações recomendadas pela STMicroelectronics .....	64
Figura 4.25- PCB para desenvolvimento dos acelerómetros STMicroelectronics .....	64
Figura 4.26-CC25xxDK com acelerómetro e SoC CC2530EM.....	65
Figura 4.27-PCB desenvolvida para o nó <i>End Device</i> .....	66
Figura 4.28-PCB do nó <i>End device</i> assemblada .....	66
Figura 4.29-Nó <i>End Device</i> instalado na caixa de proteção.....	67
Figura 4.30-PCB desenvolvida para o <i>Access Point</i> .....	68
Figura 4.31- Nó <i>Access point</i> .....	68
Figura 4.32-Antena IFA e suas dimensões. ....	69
Figura 4.33-Módulo CC1110EM com antena IFA desenvolvido .....	70
Figura 4.34-Diagrama de funcionamento do AP .....	71
Figura 4.35-Diagrama da função de criação de mensagem a enviar por porta série (UART).....	72
Figura 4.36-Diagrama de funcionamento do ED .....	73
Figura 4.37-Diagrama de funcionamento da rotina de serviço à interrupção .....	74
Figura 4.38-Diagrama do cálculo da Norma da aceleração .....	75
Figura 4.39-Janela principal da aplicação <i>Desktop</i> .....	76
Figura 4.40-Janela para registo e alteração de uma WSN e respetivos nós.....	77
Figura 4.41-Janela para inserção dos dados sobre ED descoberto .....	77
Figura 4.42-Diagrama de funcionamento da <i>thread</i> criada .....	78
Figura 4.43-Diagrama de funcionamento do temporizador.....	80
Figura 4.44-Representação do modelo de entidades e relacionamento da base de dados .....	81
Figura 4.45- Aplicação para <i>Smartphone</i> .....	82
Figura 5.1- Representação do sistema testado .....	83
Figura 5.2- Nó <i>End Device</i> fixado na estrutura de teste .....	84
Figura 5.3-Vários pontos de vista da instalação dos EDs na estrutura de teste .....	85
Figura 5.4-Janela da aplicação <i>Desktop</i> com a descrição dos nós que compõem a WSN .....	86
Figura 5.5-Janela principal da aplicação <i>Desktop</i> após efetuados alguns testes .....	87
Figura 5.6-Apresentação da WSN de teste no <i>Website</i> .....	87

Figura 5.7-Apresentação das colisões no <i>Website</i> .....	88
Figura 5.8-Apresentação dos <i>Keep Alive</i> no <i>Website</i> .....	88
Figura 5.9-Apresentação dos erros das WSNs.....	89
Figura 5.10- Teste ao tempo decorrido entre <i>Keep Alives</i> .....	91
Figura 5.11-Tempo de envio por parte do ED .....	91



# Índice de tabelas

Tabela 2-1-Resultados dos testes de colisão com peso M [1] .....	10
Tabela 3-1-Descrição dos atores envolvidos no sistema .....	32
Tabela 3-2-Consumos de energia do CC2530 (datasheet) .....	36
Tabela 3-3- Acelerómetros seleccionados .....	36
Tabela 4-1-Propriedades do Aço Galvanizado .....	43
Tabela 4-2- Condições iniciais do ensaio Massa suspensa por molas .....	45
Tabela 4-3-Condições iniciais do ensaio de uma viga a oscilar .....	49
Tabela 4-4- Cálculo da força aplicada na guarda de segurança.....	53
Tabela 4-5-Dados das simulações em 3D .....	57
Tabela 4-6- Antenas para comunicação na frequência 868MHz, (DesignNote035 TI) .....	69
Tabela 5-1-Calibração do acelerómetro para o teste prático.....	85
Tabela 5-2- Consumo energéticos teórico especificado pelos fabricantes .....	89
Tabela 5-3-Consumos energéticos medidos para o nó ED .....	90
Tabela 5-4- Preço dos componentes utilizados .....	92
Tabela 5-5-Preço por dispositivo .....	93



# Glossário

**ESRG** – Embedded System Research Group

**SDC** – Sistema de Detecção de Colisões

**WSN** – Wireless Sensor Network

**SRWSN** – Serviço de Registo a Wireless Sensor Network

**SOA** – Service Oriented Architecture

**GSM** – Global System for Mobile Communications

**GPRS** – General Packet Radio Service

**CDMA** – Code Division Multiple Access

**nesC** – Network Embedded System C

**RF** – Radio Frequency

**GUI** – Graphical User Interface

**FEM** – Finite Element Method

**MEMS** – Micro-Electro-Mechanical Systems

**SoC** – System-on-Chip

**CAD** – Computer-aided Design

**CAE** – Computer-aided Engineering

**USB** – Universal Serial Bus

**UART** – Universal Asynchronous Receiver Transmitter

**IFA** – Inverted F Antenna

**SPI** – Serial Peripheral Interface

**I<sup>2</sup>C** – Inter-Integrated Circuit

**MSS** – Sistema de Serviço de Monitorização

**PAN** – Personal Area Networks

**WPAN** – Wireless Personal Area Networks

**LR-WPAN** – Low Rate Wireless Personal Area Networks

**LAN** – Local Area Networks

**WLAN** – Wireless Local Area Networks

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

No âmbito do projeto *QREN SI I&DT “SustIMS: Sustainable Infrastructure Management System”*, em co-promoção com a empresa Ascendi, pretende-se desenvolver um sistema de monitorização em tempo-real capaz de detetar colisões com as guardas de segurança das autoestradas.

## 1.2 Motivação

Este projeto permitiu desenvolver e adquirir novas competências, relativamente às áreas de sistemas embebidos e microtecnologias (sensores MEMS). É também um projeto em que se pretende desenvolver um produto para uma empresa. Criando assim uma responsabilidade acrescida e uma maior preocupação no aperfeiçoamento do trabalho para possível aplicação do sistema de deteção de colisões (SDC) nas autoestradas do concessionário Ascendi.

A possibilidade de desenvolver um sistema que ajudará a tornar as infraestruturas rodoviárias mais seguras, é uma motivação de carácter pessoal extra.

## 1.3 Objetivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um sistema fiável, capaz de detetar a colisão de um veículo nas guardas de segurança. O sistema será implementado recorrendo a uma rede de sensores sem fios (WSN). Cada nó desta rede está

equipado com um *System-on Chip (SoC)* (microcontrolador e *transceiver* de Rádio Frequência (RF) integrado) e por alguns sensores. Pretende-se ainda, que os nós sejam autónomos do ponto de vista energético. Será ainda necessário desenvolver o coordenador da WSN que implementa o interface com a rede de telemática da concessionária utilizando a arquitetura orientada aos serviços (*SOA*) existentes.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Neste capítulo foi realizada uma pequena introdução onde são apresentadas as motivações e objetivos do desenvolvimento de um sistema de deteção de colisões nas guardas de segurança.

No capítulo 2 será discutido o estado da arte, com ênfase em algumas abordagens já existentes, sobre a monitorização de colisões de viaturas nas guardas de segurança. Identificando as vantagens, as limitações e os problemas das diferentes abordagens.

No capítulo seguinte é apresentada a especificação do sistema, sendo feito um levantamento dos requisitos do sistema. Segue-se a análise das vantagens do sistema, e a comparação com outras abordagens existentes. De seguida é descrito o funcionamento pretendido para o sistema, bem como a descrição dos componentes selecionados para a sua implementação. Neste capítulo são ainda apresentados os modelos desenvolvidos em CAD para efeitos de simulação das colisões nas guardas de segurança.

O capítulo 4 discute a implementação do SDC, iniciando-se com a discussão das simulações efetuadas e dos principais dados resultantes das mesmas. De seguida é analisado todo o *hardware* desenvolvido, nas suas várias versões. É também apresentado o *software* desenvolvido para o *SoC* selecionado, para desenvolvimento de uma aplicação para PC *desktop* de monitorização, sendo ainda apresentado um website e uma aplicação móvel desenvolvidos pelo ESRG.

O capítulo 5 é dedicado à avaliação do sistema, no que diz respeito a testes de robustez, de performance e de consumos energéticos. São também apresentados os resultados obtidos através da implementação do sistema numa estrutura de demonstração, utilizada para obtenção de dados práticos.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.





## 2. Estado da Arte

### 2.1 Sistemas de detecção de colisões

Neste capítulo serão apresentadas algumas das soluções propostas sobre a monitorização de colisões nas guardas de segurança, com o estudo e comparação dos vários métodos de abordagem ao problema, pretende-se uma melhor visão dos problemas e das dificuldades na criação e implementação de um sistema desta natureza.

### 2.2 Monitorização de colisões em guardas de segurança

Foram encontradas algumas soluções e implementações promissoras para a detecção de colisões. Nas seções seguintes serão apresentadas e discutidas as principais soluções encontradas na literatura, bem como as suas vantagens e desvantagens.

#### ***Wireless Active Guardrail System***

O Sistema *Wireless Active Guardrail System*, foi proposto no projeto de investigação "*Barriera Attiva*", desenvolvido pela Universidade de Sannio em Benevento, Itália [1] [2], o sistema tem como objetivo criar uma *Wireless Sensor Network* (WSN), capaz de monitorizar vias de circulação rodoviárias. A monitorização pretendida engloba não só as colisões, mas também a monitorização da distância de circulação dos veículos em relação às guardas de segurança. Num segundo artigo ([2]), são apresentadas novas funcionalidades

como a capacidade de monitorizar a luminosidade; a humidade; a temperatura e a qualidade do ar, (Dióxido de Enxofre, Dióxido de Carbono, Dióxido Nitrogénio e as Partículas) presentes na autoestrada, ponte ou túnel onde o sistema pode ser instalado. Na solução proposta, utilizam-se as guardas de segurança para fixar os sensores. A figura 2.1 ilustra a arquitetura do sistema proposto.

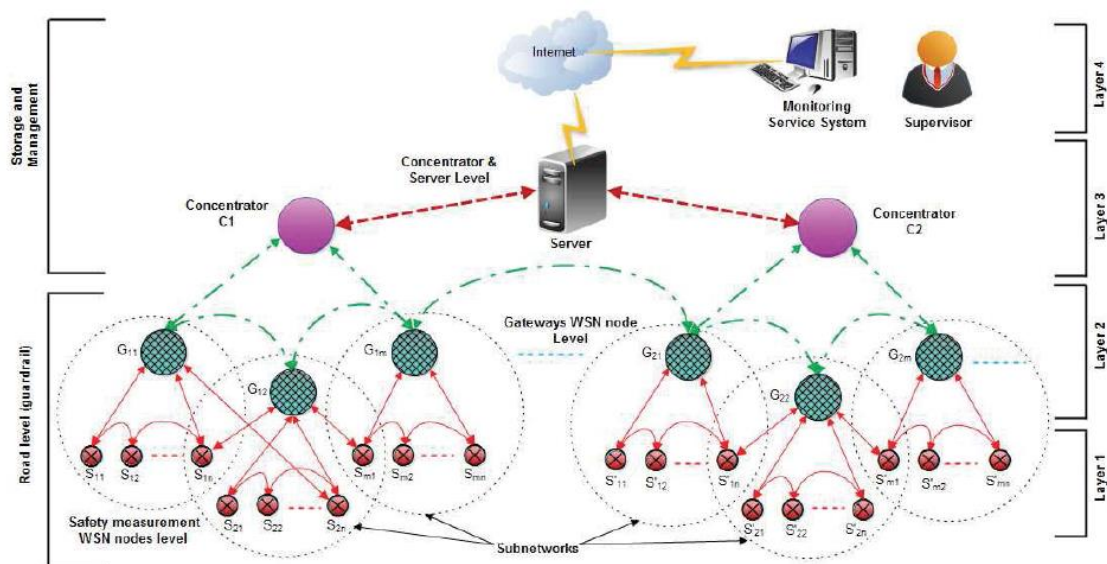


Figura 2.1-Arquitetura de camadas proposta pelo sistema [1]

A arquitetura proposta está dividida em quatro camadas, estas por sua vez dividem-se em dois grupos. As que estão fisicamente presentes nas estradas (guardas de segurança, que correspondem à primeira e segunda camada), e as que estão encarregue do processamento e armazenamento de dados (terceira e quarta camada).

A primeira camada é composta pelos nós fixados nas guardas de segurança. Tendo como função a obtenção dos parâmetros a monitorizar.

Este sistema foi desenhado para ser utilizado em longos troços rodoviários, sendo necessário adicionar uma segunda camada formada por nós (*gateway*), os quais têm como objetivo recolher a informação da camada inferior e enviá-la para os concentradores (que formam a terceira camada).

A terceira camada é composta por estes concentradores e por um servidor, os concentradores têm como função garantir uma interface entre a rede implementada na autoestrada e o servidor. Por sua vez o servidor armazena os

dados e faz um pré-processamento sobre os mesmos, enviando-os posteriormente para o sistema de serviço de monitorização (MSS) presente na quarta camada.

Por fim, a quarta camada implementa um interface para monitorização e controlo, com finalidade de possibilitar a supervisão humana de todo o sistema.

As tecnologias de comunicação entre os diferentes tipos de nós são diversas. Esta arquitetura estipula uma comunicação na banda de frequência 2.4GHz, entre os nós sensoriais e os nós da segunda camada, para garantir as comunicações entre os nós da segunda camada e os concentradores (terceira camada), é referida a possibilidade da utilização da rede móvel (GSM/GPRS). Por sua vez na terceira camada, a tecnologia usada na comunicação entre nós concentradores e o servidor também não está definida. São propostas a utilização da rede pública de telecomunicação, ou de uma rede privada por cabo ou ainda de uma possível ligação por rádio. O servidor tem uma ligação à internet, possibilitando que o sistema de serviço de monitorização (MSS) esteja disponível em qualquer local.

Para detetar as colisões através dos nós fixados às guardas de segurança, são utilizados acelerómetros, mais concretamente o sensor *ADXL326*, da *Analog Devices*. Este acelerómetro analógico tem como característica principal ser estável com as variações de temperaturas, o que se revela importante, pois o sistema pode estar exposto a variações térmicas acentuadas. O consumo energético é baixo, sendo tipicamente de 350µA. Trata-se de um acelerómetro de três eixos, com um intervalo dinâmico entre  $\pm 16g$ . A arquitetura dos nós de deteção de proximidade e de colisões é apresentada na figura 2.2, onde não só é possível visualizar os atuadores e os sensores, como também os restantes componentes requeridos para as comunicações e para a alimentação do nó.

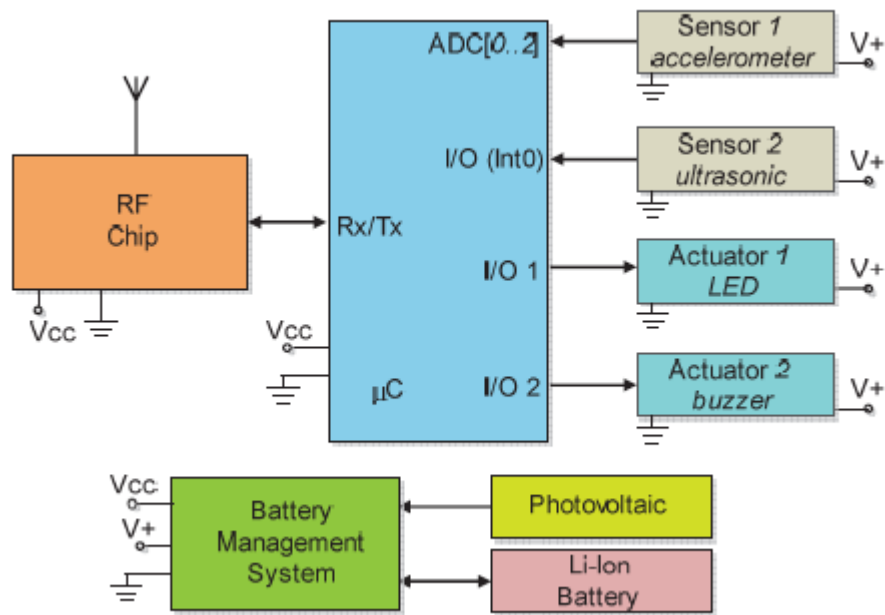


Figura 2.2-Arquitetura do nó de alerta de proximidade e detecção de colisões [1]

A arquitetura apresentada na figura 2.2, inclui um led para possibilitar vários tipos de sinalizações e um *buzzer*, que tem como finalidade emitir um sinal de alarme sonoro aos condutores. O sensor de ultrassons tem a função de medir a distância entre os veículos e a guarda de segurança.

No mesmo artigo ([1]) é apresentado um teste de laboratório ao nó sensorial (camada 1) fixado no centro da viga em W, constituinte da guarda de segurança. O nó protótipo foi colocado numa caixa plástica, utilizado um módulo de comunicação IRIS, produzido pela *Crossbow* baseado no *Atmega1281*, ao qual foi ligado o acelerómetro anteriormente referido, o *ADXL326*. Pode ser visualizado na figura 2.3 a caixa com o *hardware* mencionado, assim como a instalação da mesma na guarda de segurança.



Figura 2.3-Protótipo de um nó para deteção de colisões [1]

A estratégia adotada para efetuar os testes ao subsistema passa pelo uso de uma pêndulo de metal, o qual colide contra a guarda de segurança, como representado na figura 2.4.

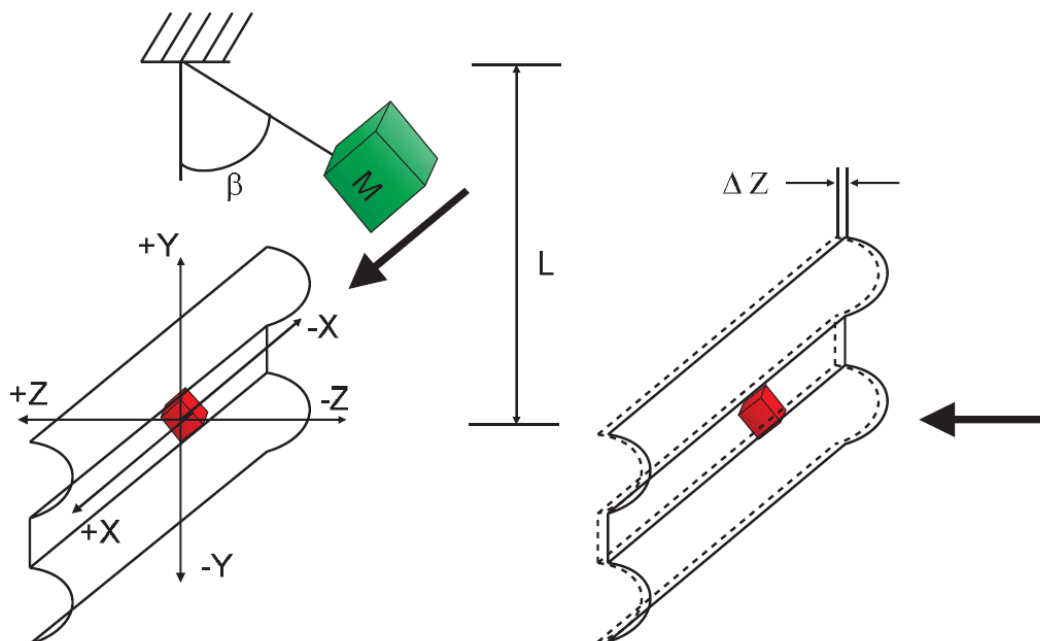


Figura 2.4-Testes em laboratório para validação do modelo [1]

Onde  $M$  representa a massa do pêndulo,  $L$  descreve a altura entre o ponto de fixação do pêndulo e o centro da colisão e  $\beta$  é o ângulo ao qual o pêndulo é libertado.

O *software* desenvolvido para este teste foi baseado no sistema operativo *TinyOS*, que faz a aquisição da aceleração medida pelo sensor no eixo Z, sendo o eixo paralelo ao movimento de oscilação do raile, no qual vão surgir acelerações no momento do impacto.

Os resultados obtidos podem ser consultados na tabela 2.1. Foram realizados dois testes, um com uma massa de 1kg, e um segundo teste com uma massa de 2kg. As condições iniciais, distância e ângulo em ambos os ensaios foram mantidas, possibilitando a comparação dos mesmos. Pode-se concluir que a aceleração não é diretamente proporcional à massa do pêndulo. Por sua vez a incerteza nos dois ensaios é igual,  $\Delta a_z=0,05g$ .

**Tabela 2-1-Resultados dos testes de colisão com peso M [1]**

Parâmetros	Testes preliminar de laboratórios	
	Teste1	Teste2
Peso M [kg]	1	2
Distância L [m]	2	2
Ângulo B [°]	18	18
Aceleração eixo Z [g]	+4,80	+7,25
$\Delta$ Aceleração eixo Z[g]	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$

Em resumo, o sistema apresentado é uma boa proposta, pois procura resolver e proporcionar muitos avanços tecnológicos em matéria de apoio rodoviário. Ainda se encontra numa fase bastante concetual e em desenvolvimento. No entanto, aparenta ser um sistema com elevados custos de implementação e um grande número de nós por quilómetro, sendo que os nós fixados às guardas de segurança têm como distância prevista 4 a 10 metros entre eles. Para a



A unidade responsável pela deteção de colisões nas guardas de segurança é composta pela placa de desenvolvimento IRIS Mote da *CrossBow*, à qual é conectado um acelerómetro analógico de três eixos, também fabricado pela *CrossBow* o *CXL10GP3*. Este nó está fixo nas guardas de segurança.

Para a captura da imagem no momento da colisão é necessário uma unidade dedicada, composta por uma câmara analógica conectada a uma placa de desenvolvimento *Imote<sup>2</sup>* da *Intel*. Posicionado numa localização com boa visibilidade para a área a monitorizar.

O nó coordenador é responsável por criar a ligação de dados entre a rede local e a central de controlo, é composta por uma placa IRIS mote. Tendo como tarefa o envio das imagens capturadas pela unidade de imagem para a central de controlo, e a receção de comandos da central. Esta unidade é instalada, num local que garanta a comunicação com os restantes nós da WSN.

A estação central é responsável por receber em tempo real as imagens e processar a informação. Para melhor compreensão da situação na zona a monitorizar, a central tem a função de enviar pedidos de recolha de imagem quando necessário.

As três primeiras unidades formam uma rede local baseada em IEEE 802.15.4 (*ZigBee*). O nó coordenador necessita de criar uma ligação com a central, a qual apresenta um volume de dados significativo. Para grandes distâncias os autores apontam o uso preferencial da rede móvel, tecnologias como GSM, GPRS ou CDMA. Possibilitando assim uma comunicação a longa distância fiável. Contudo, no teste prático realizado com a tecnologia *ZigBee*, foi verificado que a fiabilidade da comunicação é de 90% sendo uma opção a curta distância.

O diagrama de funcionamento do sistema proposto neste artigo está ilustrado na figura 2.6. O sistema, após inicialização, entra num ciclo infinito de aquisição do valor de aceleração na guarda de segurança, até que esse mesmo valor seja superior ao valor estipulado. O nó responsável pela deteção de acelerações envia um comando ao nó da câmara para ativar a captura de imagem do local sob monitorização. Desta forma, a imagem é capturada e processada sendo posteriormente enviada para a estação central, onde finalmente é dada a possibilidade de capturar uma nova imagem do local.



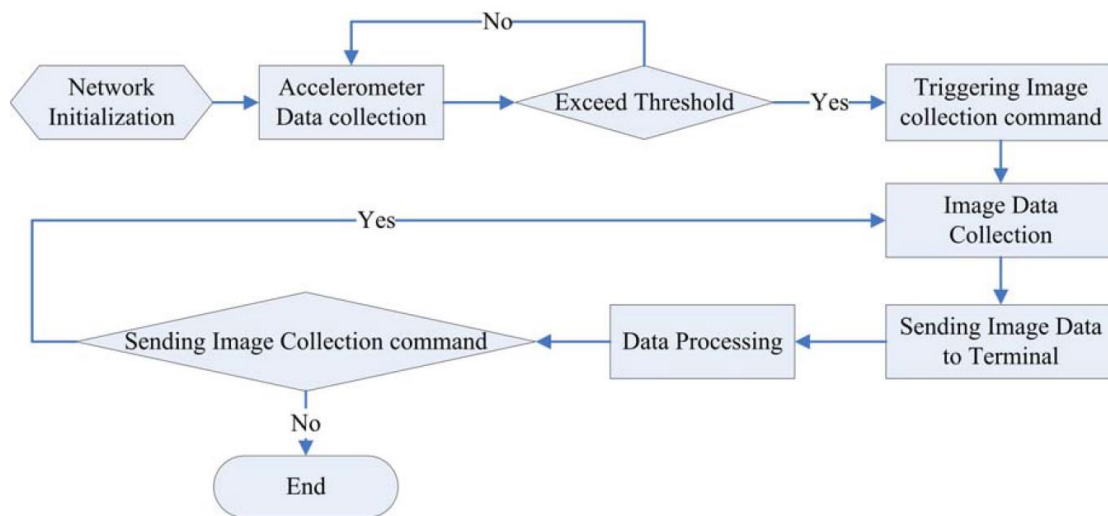


Figura 2.6-Diagrama de funcionamento [3]

A programação de baixo nível, correspondente à programação dos nós da WSN, foi implementada com recurso a linguagem *network embedded system C* (*nesC*), a qual é uma extensão da linguagem C. Esta linguagem é utilizada para criar aplicações no sistema operativo *TinyOS*, um sistema operativo desenvolvido para sistemas sem fios de baixo consumo.

O *Graphical user interface (GUI)* utilizado para testes foi desenvolvido na linguagem de programação C#.

Foram realizados diversos testes práticos no terreno. Na figura 2.7, pode ser visualizado a instalação de teste ao sistema. O sistema de testes implementado pode ser consultado na figura 2.8, onde é possível visualizar a câmara utilizada, bem como a instalação do acelerómetro na parte de trás da viga tipo W, componente da guarda de segurança.



Figura 2.8-Demo para teste [3]

Figura 2.7-Testes no terreno [3]

A metodologia de teste adotada consiste na captura de 50 fotografias em cada detecção de colisão. Não é indicado o período entre capturas de fotografias, mas é referido que o terminal demora entre 3 a 5 minutos para a totalidade das fotografias, na figura 2.9 é possível visualizar o interface criado.



Figura 2.9-Recepção de imagens no interface [3]

Foi também testada a opção de pedido de captura disponível no interface, após o pedido ser efetuado, o sistema espera cerca de três segundos, seguindo-se

a captura da foto que é enviada para o terminal. Este processo demora entre 5 a 15 segundos.

Movendo o ponto de colisão para 22 metros de distância em relação ao acelerómetro, foi possível confirmar que as acelerações são menores quanto mais afastado o ponto de colisão for do acelerómetro.

Em resumo o sistema proposto é uma abordagem válida, tendo sido provado com os respetivos testes no terreno. Este sistema, comparado com o descrito anteriormente ([1]) introduz um novo tipo de sensor e uma nova abordagem ao problema, a qual consiste na captura de imagem nos instantes seguintes a uma colisão com a guarda de segurança. Possui a vantagem de em condições normais possibilitar uma imagem em tempo real do ocorrido ao supervisor, facilitando a determinação da gravidade da colisão. Como desvantagem, existe a necessidade de colocar as câmaras em pontos estratégicos, o que nem sempre é fácil, exigindo estruturas mecânicas dedicadas. Adicionalmente as condições de visibilidade (condições climatéricas adversas ou período noturno) podem afetar o sistema. Mesmo na possibilidade da colocação de câmaras rotativas, essas mesmas câmaras são mais dispendiosas, com mais consumo energético devido ao movimento e necessitam de um algoritmo para apontar para o local alvo. Adicionalmente na própria infraestrutura rodoviária é possível que já existem câmaras de trânsito, capazes de permitir a visualização de praticamente toda a via. Nestes caso, uma ligação entre sistemas permite obter imagens também em tempo real, reutilizando *hardware* já disponível e instalado nas infraestruturas rodoviárias.

### **Sistema Red-Wine da SisTra**

*Red-Wine* é um sistema desenvolvido pela unidade *Sistra Ltd* da empresa italiana *Sistra*. Esta unidade foi criada em 2010 para supervisão do desenvolvimento do protótipo do sistema. Não tendo sido possível encontrar mais informação sobre este sistema, a análise a esta abordagem será feita com base na informação disponibilizada pelo *website* da empresa [4].

O sistema *Red-Wine* tem como finalidade proporcionar aos seus clientes um serviço de detecção de colisões com as guardas de segurança, monitorização de tráfego e condições atmosféricas.

Para monitorizar o tráfego, o sistema recorre a sensores de infravermelhos capazes de medir a energia emitida por um veículo provocado pelas altas temperaturas do motor, possibilitando assim a detecção dos veículos. Dependendo do afastamento entre nós, e do algoritmo utilizado, é possível detetar o sentido, a área ocupada e a velocidade dos veículos.

Em termos de condições atmosféricas, o sistema *Red-Wine* reúne uma série de sensores capazes de medir a temperatura, a humidade relativa do ar e a luminosidade. Estes quatro parâmetros, devidamente processados, permitem determinar a provável formação de gelo ou geada, o qual pode afetar e condicionar o fluxo de trânsito.

Para a monitorização das guardas de segurança, os nós do sistema estão equipados com acelerómetros analógicos de três eixos, possibilitando a detecção de colisões. O sistema foi alvo de inúmeros testes de colisão, sendo estes testes efetuados com o sistema instalado numa guarda de segurança. Foi criado assim, uma base de dados de eventos possibilitando o reconhecimento de uma colisão. Tendo cada nó do sistema uma cobertura de 150 metros de raio, de modo a ter uma cobertura completa, o espaçamento entre nós pode ir até aos 300 metros, continuando a permitir a detecção de anomalias no trânsito. O sistema classifica as colisões em três tipos diferentes de intensidades sendo: leve, médio e violento. Podendo ainda ser detetado deslizamentos de terras e desmoronamento de pedras contra as guardas de segurança. O sistema *Red-Wine* é capaz de alertar os condutores e os responsáveis da infraestrutura recorrendo a painéis de mensagens instalados nas respetivas vias de circulação, sms ou e-mail, sendo também referido a existência de uma plataforma Web disponibilizada com o sistema aos clientes.

A empresa *Sistra* tem vindo a desenvolver este sistema desde 2007, sendo que em 2012 concluiu o protótipo final, o qual pode ser visualizado na figura 2.10, este módulo engloba todos os sensores anteriormente referidos. É ainda avançado que estes nós comunicam entre eles via módulos radiofrequência (RF), criando assim uma WSN.

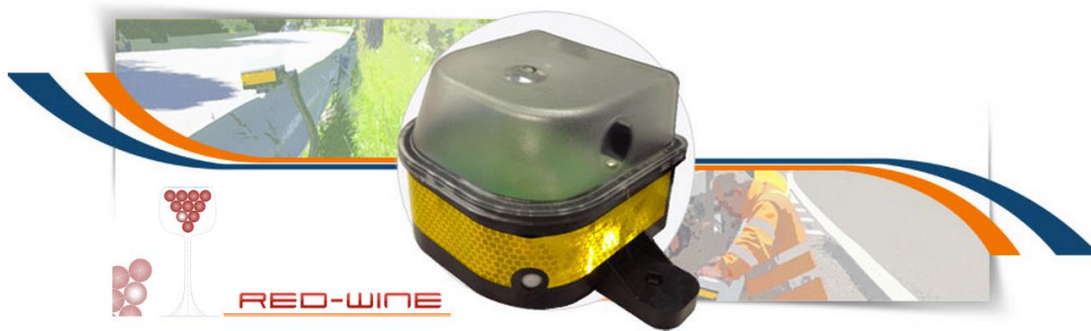


Figura 2.10- Nó do sistema *Red-Wine*

Um *gateway* é responsável por recolher e enviar a informação para o sistema central, não são fornecidos detalhes sobre as tecnologias aplicadas nas comunicações do sistema.

A empresa disponibiliza um mapa, o que pode ser consultado na figura 2.11, o qual indica as instalações já efetuadas no terreno, duas instalações no norte de Itália e uma instalação na Áustria, não avançando se são instalações de teste ou aquisição do sistema por parte de clientes. Porém referem a interação com clientes desde da criação da unidade *Sistra Ltd* em 2010, onde as instruções e necessidades dos mesmos são levados em conta no desenvolvimento do sistema.



Figura 2.11- Mapa das instalações do sistema *Red-Wine*

Avaliando o sistema com a informação disponibilizada, pode-se concluir que na opinião do autor, trata-se da melhor solução existente no mercado. A comercialização deste sistema é demorada, a empresa tem um sistema base com várias potencialidades, as especificações e objetivos do sistema podem variar de cliente para cliente, criando a necessidade de alterar o funcionamento do sistema, tornando a venda do mesmo demorada. No entanto torna o produto mais apelativo e mais vantajoso adaptando-se melhor às necessidades do cliente.

Numa análise mais técnica, não são fornecidos informações muito detalhadas sobre o *hardware* ou *software* utilizados, ou algoritmos desenvolvidos. Não sendo possível por isso fazer uma justa comparação com as demais abordagens, quanto à escolha de componentes ou tecnologias de comunicação.

Nesta solução é utilizado um acelerómetro para a deteção de colisões, é uma escolha tal como em todas as abordagens estudadas. No que diz respeito à validação do sistema de deteção de colisões, esta foi realizada recorrendo a testes experimentais, onde foram provocadas colisões de modo a criar uma base de dados de históricos.

Ao nível da comunicação na WSN é avançado ser por *RF*. Não são fornecidos mais detalhes da solução técnica adotada. Como também não são referidos dois fatores chave: o custo da solução e a autonomia energética.

## **2.3 Acelerómetros**

No início desta dissertação foi decidido que a deteção de colisões deveria ser realizada recorrendo a um acelerómetro, todas as soluções existentes analisadas recorrem a um acelerómetro para detetar as colisões. Nesta secção é feita uma breve introdução teórica e uma análise dos acelerómetros existentes.

Os acelerómetros são sensores inerciais capazes de medir a aceleração em um ou mais eixos. Tipicamente, os acelerómetros são constituídos por uma massa de reação suspensa por uma estrutura estacionária. Este sistema massa-mola está alojado dentro do CI, que é fixado ao corpo ao qual se pretende monitorizar a aceleração.

Quando aplicado uma aceleração ao conjunto corpo-acelerómetro, a massa suspensa vai-se opor ao movimento. O deslocamento permitido pela estrutura que suspende a massa é proporcional à força aplicada, por sua vez, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa. Na figura 2.12 é representado o princípio de funcionamento do sistema massa-mola, em A) o sistema está em repouso, estando a mola na sua forma normal. Em B) foi aplicado uma aceleração para a esquerda, fazendo deslizar a massa para a direita, estando ela a se opor ao movimento, a mola fica estendida sendo aplicada uma força sobre a massa proporcional à distância ( $KX$ ) em que  $K$  é o coeficiente de elasticidade da mola (Estrutura que suporta a massa).

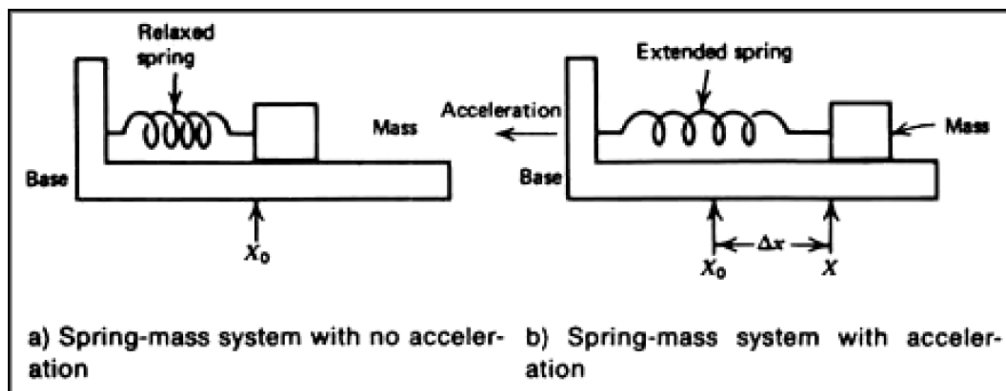


Figura 2.12-Sistema massa-mola básico [5]

Devido ao seu baixo custo e à simplicidade do processo de fabrico, os acelerómetros são muito utilizados para medir outras grandezas, tais como: inclinações, vibrações, colisões e acelerações estáticas.

### 2.3.1 Tipos de acelerómetros

Os acelerómetros MEMS estão a substituir os acelerómetros mecânicos [6], explorando as propriedades do silício possibilitando a criação de estruturas moveis, como é o caso do sistema massa-mola anteriormente referenciado. Na figura 2.13 está representado a massa suspensa por estruturas de suporte que estão fixas na outra extremidade. Estas estruturas funcionam como molas, opondo-se ao movimento da massa.

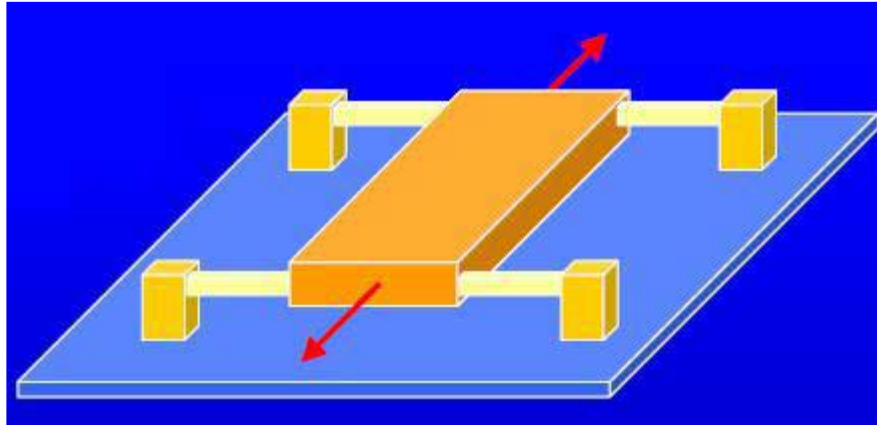


Figura 2.13-Representação da massa de um acelerômetro suspenso por suportes fixos [7]

Estes sensores inerciais são sensíveis, compactos e de custo reduzido, têm também como característica a incorporação de eletrônica, a qual possibilita a leitura de um, dois ou três eixos, com saída digital ou analógica de grande precisão. Os acelerômetros mais comuns são do tipo capacitivos, piezoelétricos ou piezoresistivos. Cada um possui características únicas, vantagens e desvantagens.

### **Capacitivos**

Os acelerômetros capacitivos formam condensadores entre a estrutura móvel e a estrutura de suporte. Uma aceleração da massa provoca uma variação no espaço entre as estruturas, fazendo com que o espaçamento entre as placas que formam o condensador, variando a capacidade elétrica, o que faz por sua vez variar o sinal de saída do circuito.

### **Piezoelétricos**

Nos acelerômetros piezoelétricos, a massa suspensa é unida a um cristal piezoelétrico. Os quais podem ser cristais de origem sintética ou natural, quando comprimidos ou fletidos produzem carga. Quando o corpo do acelerômetro é sujeito a vibrações, a massa submete o cristal à força de tração e compressão gerando cargas. A medição dessas cargas possibilita caracterizar o quanto a massa se mexe e descobrir o valor da aceleração presente.

### **Piezoresistivos**



Neste tipo de acelerómetros, comparativamente aos do tipo piezoelétricos, é substituído o cristal piezoelétrico por um componente piezoresistivo. A força exercida pela massa faz variar a resistência, a qual é detetada por uma ponte de Wheatstone. Este acelerómetro tem a vantagem comparativamente aos demais de possibilitar a medição de acelerações até aos 0 Hz.

A seleção de um acelerómetro para uma determinada aplicação necessita ter em atenção diversos parâmetros, sendo os mais importantes a largura de banda, a sensibilidade, resolução, a gama dinâmica e a linearidade. Todas estas informações estão normalmente disponíveis nos *datasheet* do sensor, fornecido pelo fabricante.

### 2.3.2 Aplicações

A área de aplicação dos acelerómetros é muito vasta, devido ao seu baixo custo, reduzido tamanho e fiabilidade. Por todas estas razões são embutidos e utilizados em todo o tipo de dispositivos, veículos e até em construções. Na figura 2.14 está ilustrada a disposição e os tipos de sensores MEMS presentes nos automóveis na atualidade [5]. Os acelerómetros estão presentes nos veículos em sistemas de segurança como o disparo dos *airbags*, no controlo dos cintos de segurança, nas suspensões ativas, controlo de tração e estabilidade, entre outros sistemas existentes.

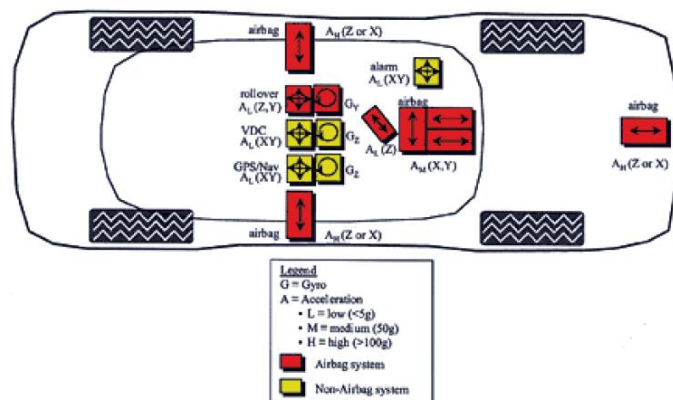


Figura 2.14-Sensores MEMS presentes nos automóveis da atualidade [5]

Graças a tecnologia MEMS, na atualidade os acelerómetros estão com um custo que se torna suportável para cada vez mais áreas, as quais a alguns anos não podiam

incluir acelerômetros pelo preço e tamanho dos mesmos. A figura 2.15 representa as aplicações dos acelerômetros na atualidade, tendo em conta a gama de aceleração medida e a largura de banda. Alguns exemplos dessas aplicações são as plataformas de estabilidade de imagem das câmaras de vídeo, aplicações em sistemas de realidade virtual, sistema de apoio ao GPS, monitorização de choques durante o transporte de bens valiosos, brinquedos eletrónicos, entre outros.

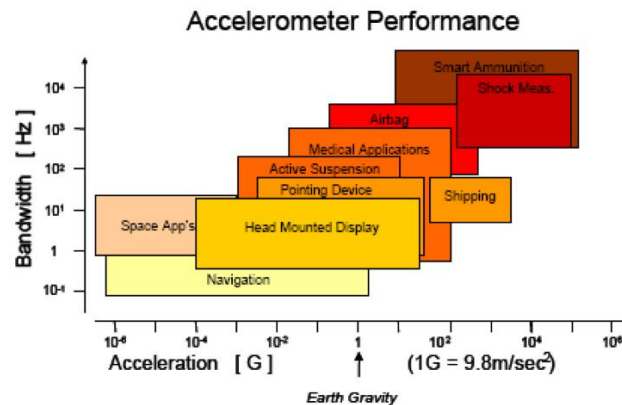


Figura 2.15-Aplicação dos acelerômetros na atualidade [6]

## 2.4 Sistemas existentes para deteção de vibrações

A monitorização de vibrações pode ser efetuada através da medição de grandezas físicas como: velocidade, deslocamento ou aceleração [7]. Para tal são necessários sensores capazes de converter essas grandezas em outras, como tensão ou corrente possibilitando a análise e a monitorização. Os sensores que possibilitam a deteção de vibrações são três:

- Sensores de deslocamento
- Sensores de velocidade
- Sensores de aceleração

Os sensores de deslocamento têm como característica uma gama de operação relativamente pequena entre 0 a 100Hz, pois são utilizados para frequências muito baixas. Existem vários tipos de sensores de deslocamento, dos quais os mais utilizados são os capacitivos, os óticos [7] e os sensores de ultrassons. Nos capacitivos o

deslocamento faz variar a distância entre as placas do condensador e conseqüentemente a sua capacidade. Quanto aos óticos, estes baseiam-se na utilização de lasers. Os sensores de ultrassons emitem ondas sónicas, as quais ao encontrar um corpo são refletidas de volta para o sensor, o tempo decorrido permite determinar a distância ao objeto.

Por sua vez os sensores de velocidade tem uma gama de operação superior aos sensores de movimento (0 a 1000Hz [7]), estes sensores são essencialmente utilizados na monitorização de equipamentos rotativos.

Na deteção de vibrações, os acelerómetros são os sensores mais utilizados [7]. Pois são os sensores com maior gama de frequência (0 a 20KHz), sendo ainda os sensores com maior escolha em termos de preço e tamanho. Devido como anteriormente referido em (§2.3.2) à tecnologia MEMS.

## **2.5 Wireless Sensor Networks (WSN)**

As WSN [8] [9] são redes vocacionadas para a monitorização e controlo de determinada aplicação, sendo uma rede sem fios constituída por nós equipados com sensores, dispostos na área a monitorizar de forma aleatória, ou colocados estrategicamente, dependendo da aplicação. São muitas vezes criadas em locais onde se torna impossível a passagem de cabos.

### **2.5.1 Aplicações das WSN**

Este tipo de redes tem inúmeras aplicações [2] [3] [1] [10], desde de utilizações simples como fazer uma medição de temperatura à deteção de diversos parâmetros e monitorização e atuação de todo o tipo de cenários, desde fogos florestais a vibrações de pontes passando por controlo de ventilações e monitorização de todo o corpo humano. Com a miniaturização dos integrados e sensores necessários para criarem os nós, são abertas as portas para novas aplicações com necessidades de miniaturização dos nós.

## 2.6 Standard IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15 é um grupo de trabalho que especifica os *standards* para as redes de área pessoal sem fio (PAN). Dentro deste grupo existe um subgrupo de trabalho denominado 4, o qual especifica a camada física (*PHY*) e a camada de acesso ao meio (MAC) de redes de área pessoal sem fios de baixo débito (LR-WPAN), originando o *standard* IEEE 802.15.4 [11]. Este *standard* pretende oferecer redes sem fios de baixo custo de implementação, dedicadas, com protocolos simples e orientadas a baixo consumo de energia. A figura 2.16 ilustra uma pequena comparação [12], no que diz respeito à complexidade, consumo energético e taxa de transferência de dados de vários *standards* de redes sem fios de área pessoal (WPAN) e de área local (*Wireless Local Area Network, WLAN*).

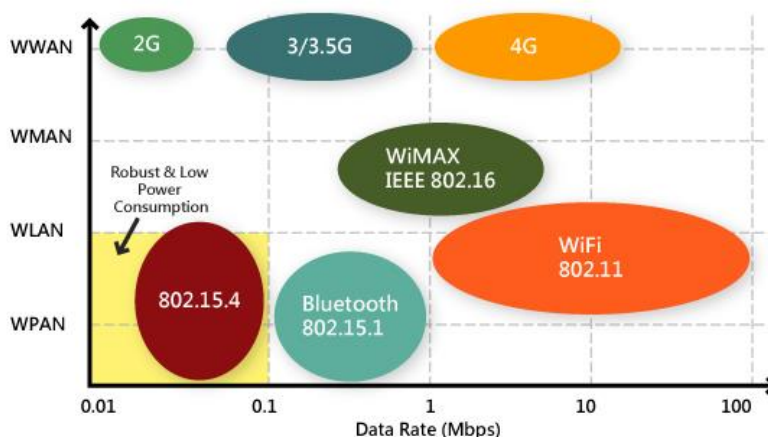


Figura 2.16-Comparação dos vários *standards* de redes sem fios [13]

## 2.7 Stack simplicITI da Texas Instruments

A *SimpliciTI* da *Texas Instruments* [14] foi a *stack* proposta pelo grupo, a qual define um protocolo de rede que pode funcionar sobre dispositivos que suportam o IEEE 802.15.4 utilizando as gamas dos 2.4GHz e 868MHz. Esta *stack* permite criar WSN com topologias em estrela, árvore e malha (figura2.17). Com nós do tipo *end device*, *access point* e *repeaters*.

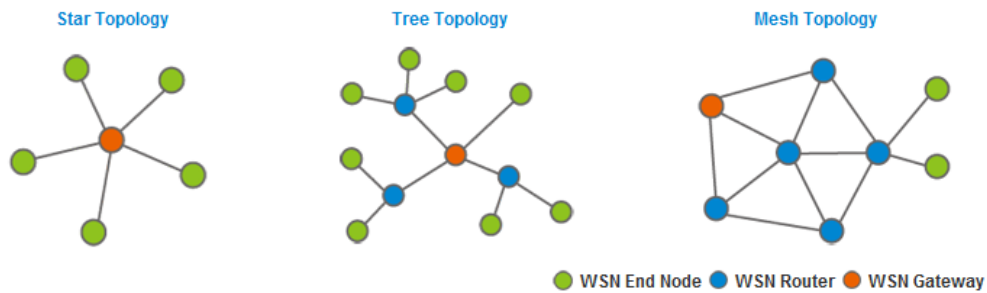


Figura 2.17-Tipos de topologias para WSN [13]

A *stack* da *SimpliciTI* é totalmente *Open Source* e orientada à eficiência energética. O espaço ocupado em memória por esta *stack* é muito reduzido, fazendo dela uma boa aposta para utilização em dispositivos com limitações em termos de memória e processamento. Na figura 2.18 pode ser consultado a comparação com as *stack* concorrentes à *SimpliciTI*, ao nível das várias camadas, das frequências de funcionamento, como também os dispositivos suportados.

Solution / Layer	Proprietary	SimpliciTI	IEEE 802.15.4	ZigBee
Application	Design Freedom	Design Freedom	Design Freedom	Design Freedom
Higher Layer Protocol	Design Freedom	Design Freedom	Design Freedom	Z-Stack + Simple API
Lower Layer Protocol	Design Freedom	SimpliciTI	TI MAC	TI MAC
Physical Layer	all LPRF devices	CC111x, CC251x, CC243x, CC253x, CC430, MSP430+CC1101, CC2500 or CC2520	CC253x, CC243x, MSP430+CC2520	CC253x, CC243x, CC2480
RF Frequency	2.4 GHz, Sub 1 GHz	2.4 GHz, Sub 1 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz

Figura 2.18: Comparação entre os vários tipos de tecnologias sem fios

## 2.8 Resumo

Neste capítulo foram apresentadas as abordagens existentes sobre a deteção de colisões. Foi realizada uma análise à metodologia adotada por cada uma das soluções expostas. Algumas das soluções e resultados reportados permitiram, na ótica do autor, especificar e projetar um sistema de deteção de colisões com melhores características do que os existentes.



## 3. Especificação do Sistema

Neste capítulo é feita a especificação do sistema proposto, mais concretamente são apresentados os requisitos e arquitetura. No âmbito desta dissertação, é apresentada a arquitetura dos nós da WSN, sendo os componentes selecionados para suas implementações tais como o microcontrolador, o acelerómetro, a bateria e uma caixa de proteção adequada às necessidades do sistema.

### 3.1 Requisitos do sistema

Como foi referido no Capítulo 1, o projeto desenvolvido no âmbito desta dissertação é composto por um sistema para a deteção de colisões nas guardas de segurança nas autoestradas. O sistema é definido pelos seguintes requisitos:

- Garantir a fiabilidade na deteção de colisões, permitindo que todos os nós da rede estejam ativos para deteção de uma eventual colisão e consequente notificação da concessionária;
- Baixo custo e baixo consumo energético a fim de minimizar as despesas de manutenção;
- Capacidade de funcionar sobre todo o tipo de condições climáticas. Este requisito tem especial importância na conceção do *hardware*;
- Sinalizar a existência de uma colisão para além de detetar a sua localização;
- Ter um sistema central com capacidade de gestão das colisões e da(s) WSN (nós e topologia da rede).

Para melhor análise dos efeitos de uma colisão de um veículo nas guardas de segurança foi necessário recorrer a simulação através do método de elementos finitos (FEM, *Finite Elements Method*). Foi desenvolvido um modelo 3D das guardas de segurança utilizadas e foi aplicado um degrau de força para simular o embate de um veículo. Para a análise foi utilizada a ferramenta de *software Ansys 12.0* (§3.7).

O primeiro nível do sistema tem como base a utilização de nós da WSN equipados com acelerómetros, capazes de detetar acelerações nas guardas de segurança, após o embate de um veículo. Para dar suporte à transferência de dados entre os nós e o sistema de gestão, é necessário a criação de uma WSN para interligar todos os nós instalados na guarda de segurança. A WSN é composta por vários nós do tipo *end device* (ED) e um *access point* (AP). Um ED é composto por um acelerómetro, uma unidade de energia (bateria), um *SoC*, sendo os mesmos fixados às guardas de segurança. Por sua vez um AP é colocado fora das faixas de rodagem, para proteção do mesmo. Este serve como *gateway* dos EDs e comunica com o sistema de gestão, a qual processa e regista os eventos e informa as autoridades competentes.

## **3.2 Vantagens do sistema proposto**

As vantagens do sistema proposto são diversas, a principal é a deteção rápida de uma colisão nas guardas de segurança 24/7/365, permitindo uma rápido auxílio, assim como alertar os demais condutores, apelando à prudência e cautela. Sendo que além da deteção de colisões de veículos, também pode ser ainda detetado deslizamentos de terras e desmoronamentos de pedras contra as guardas.

Comparativamente às abordagens apresentadas no capítulo 2, o sistema desenvolvido apresenta algumas vantagens. A primeira é a utilização de modelos de colisões, o que aumenta a fiabilidade na deteção destas. A segunda vantagem é um previsível custo da solução (§5.3) de instalação e de manutenção inferior

A análise de colisões é realizada com base em simulações, como anteriormente referido, proporcionando uma aproximação mais realista ao problema. São considerados diversos fatores como a frequência natural de vibração das guardas de



segurança após uma colisão e ainda a amplitude da aceleração nos pontos de medição.

Para minimizar os custos dos nós da WSN, o *hardware* dos mesmos foi desenhado especificamente para as necessidades do sistema em questão. Quando comparado com nós *COTS*, geralmente dispendiosos, genéricos e com recursos que não são necessários a esta aplicação, o custo dos nós projetados é gerido tendo em atenção os requisitos de monitorização deste sistema. O custo global do sistema também é reduzido porque são utilizados menos nós por quilómetro do que nas abordagens apresentadas em [1] e [2], sendo ainda possível monitorizar apenas locais considerados “pontos negros”, com a instalação de uma WSN em cada um destes locais.

O sistema pretendido tem como requisito importante, assegurar que, na ocorrência de uma colisão, esta seja detetada. Para garantir a deteção da colisão é importante conhecer a frequência de ressonância da guarda de segurança, permitindo obter uma frequência de amostragem adequada, evitando o efeito de *aliasing*, assim como conhecer o amortecimento das ondas de choque ao longo da guarda de segurança. Estas características foram obtidas recorrendo à simulação FEM. A obtenção destas permite que os nós sejam colocados com um espaçamento correto, assegurando que a comunicação do evento é feita com sucesso. Este projeto utiliza um sistema de redundância, onde vários nós colocados no ponto negro comunicam ao sistema central que detetaram uma colisão.

Por sua vez, a integridade física do sistema também é uma questão pertinente, pois este precisa de estar protegido das condições atmosféricas e das colisões. O *design* dos circuitos impressos e a seleção das caixas de proteção foram feitos tendo em conta este aspeto.

### **3.3 Funcionamento do sistema proposto**

O sistema proposto foi dividido em dois subsistemas: um primeiro denominado “Serviço de registo de WSN” (SRWSN) e um segundo denominado, de um modo

genérico, como “WSN”. Na figura 3.1 está representado o diagrama de *Deployment* do sistema onde é possível visualizar estes dois subsistemas.

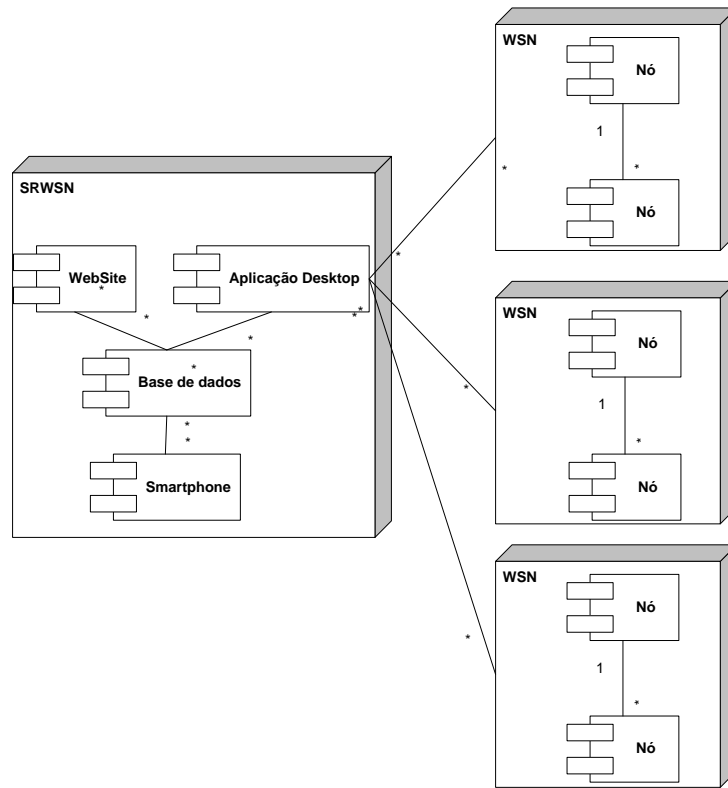


Figura 3.1-Diagrama de *Deployment* do sistema

O SRWSN (§4.4) é responsável pelo alto nível do sistema, incluindo o interface com os utilizadores, através da aplicação para PC *desktop*, *Website* ou aplicação para *Smartphone*. Sendo ainda responsável pelo armazenamento dos dados de alertas e colisões na base de dados. O subsistema WSN representa todas as WSNs que possam existir no sistema, onde são feitas interações com os nós existentes no terreno e as viaturas que originam as colisões na guarda de segurança.

No diagrama Use-Case da figura 3.2, pode ser visualizado a interação dos atores com o sistema, sendo ainda na tabela 3.1 descritos estes mesmos atores.

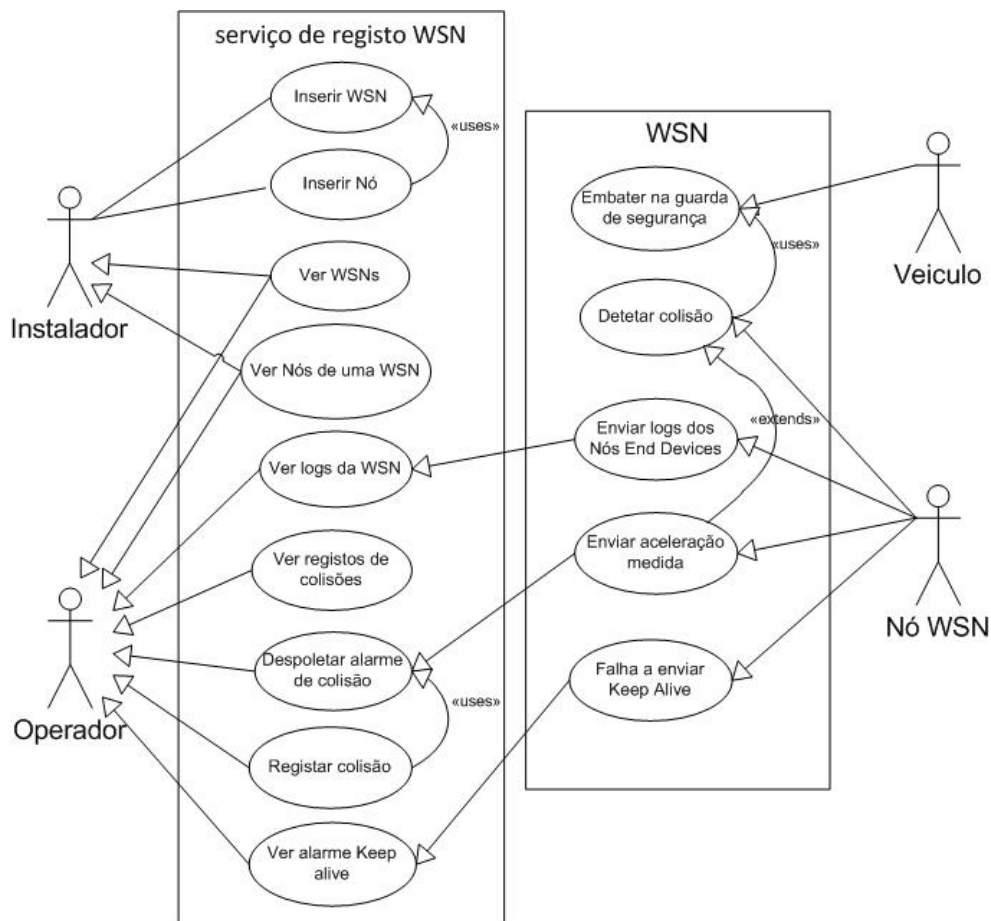


Figura 3.2-Diagrama Use-Case do sistema

Analisando as interações do Use-Case, verifica-se que o Instalador tem como tarefa a instalação das WSNs, a qual é dividida em dois passos: a instalação física da rede e o registo desta no SRWSN. Relativamente ao segundo passo, um Instalador pode criar várias WSNs e associar-lhe nós. Para auxiliar a tarefa e garantir uma devida instalação das WSN, o Instalador tem também a possibilidade de visualizar as WSN introduzidas até ao momento, e os seus respetivos nós associados.

Por sua vez, um Operador tem a possibilidade de visualizar todos os dados e alarmes do sistema. Este pode consultar, tal como o Instalador, a estrutura das WSNs e ainda visualizar os *logs* dos nós, os alarmes de colisão e as falhas de comunicação entre os nós. Este ator tem a característica de ser quem ativa os meios exteriores ao

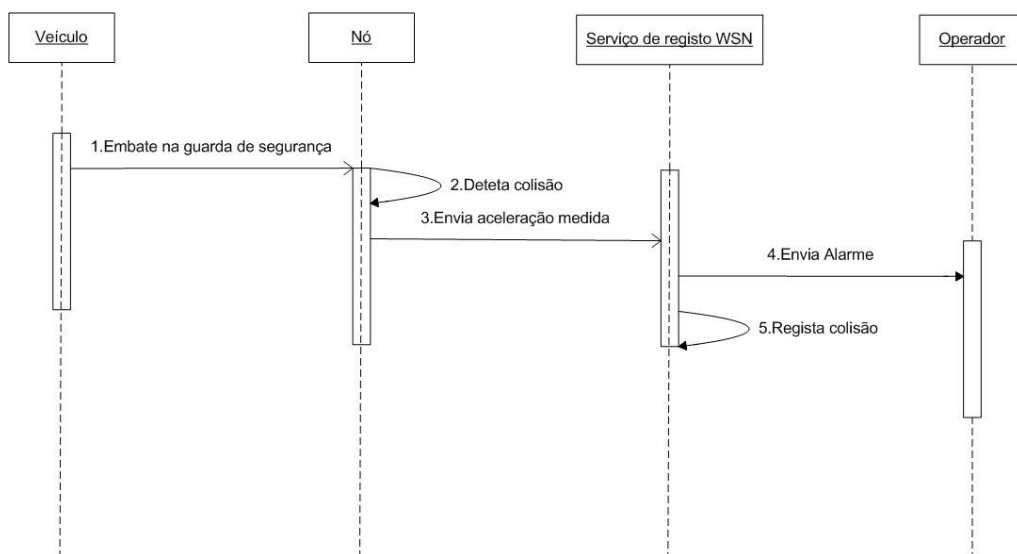
sistema, como equipas de auxílio e equipas de manutenção das redes instaladas no terreno.

Tabela 3-1-Descrição dos atores envolvidos no sistema

Ator	Descrição
Instalador	Pessoa responsável por se deslocar ao terreno e instalar os nós da WSN.
Operador	Pessoa responsável por visualizar a informação apresentada pelos sistemas e de agir em conformidade com essas informações.
Veículo	São todos os veículos que transitem na via em monitorização que possam embater nas guardas de segurança.
Nó WSN	É entendido como nó todas as unidades instaladas no terreno que formam uma WSN.

Os atores **Veículo** e **Nó WSN** interagem com o subsistema “WSN”, sendo que a interação de um Veículo com a WSN e com o resto do sistema é a ocorrência da própria colisão. Uma colisão é detetada por um Nó WSN, que a reporta ao SRWSN enviando a aceleração lida dos sensores. O Nó WSN tem ainda uma interação periódica com o SRWSN, denominada *Keep Alive* (§4.4.2), a qual permite ao sistema saber que os nós continuam ativos e funcionais ao longo do tempo.

O diagrama de sequência da figura 3.3 representa de uma forma simplificada a interação entre os atores do sistema após uma colisão.



**Figura 3.3-Diagrama sequencial de funcionamento geral do sistema**

Após o embate de um Veículo nas guardas de segurança (1), o nó deteta a colisão (2). Todos os nós envolvidos enviam a aceleração lida (3) para o Serviço de registo WSN. Este envia um alarme (4) para o Operador e de seguida regista a colisão (5) na sua base de dados. O Operador deve executar as ações previstas após ser notificado da colisão.

### 3.4 Topologia da WSN

A topologia adotada para implementação da WSN é a topologia em estrela, onde é estabelecida uma ligação ponto a ponto entre o ED (*nó que deteta a colisão*) e o AP. Na figura 3.4 está representada a disposição dos nós no caso de uma estrada sem separador central, a qual tem apenas duas guardas de segurança laterais (não representadas na figura). Os Nós ED estão posicionados ao longo da estrada, estando o Nó AP num local intermédio, não necessariamente junto às guardas de segurança. Em linhas tracejadas estão representadas as ligações ponto a ponto da WSN. Por sua vez, um AP comunica com o Serviço de registo da WSN.

Esta topologia foi escolhida devido ao sistema ter como características o baixo fluxo de dados entre ED e AP e a necessidade de enviar os dados o mais rápido possível para o serviço de registo Remoto da WSN. Logo os dados recolhidos devem ser

enviados diretamente para o AP, fazendo com que esta topologia seja prática e adequada para o sistema.

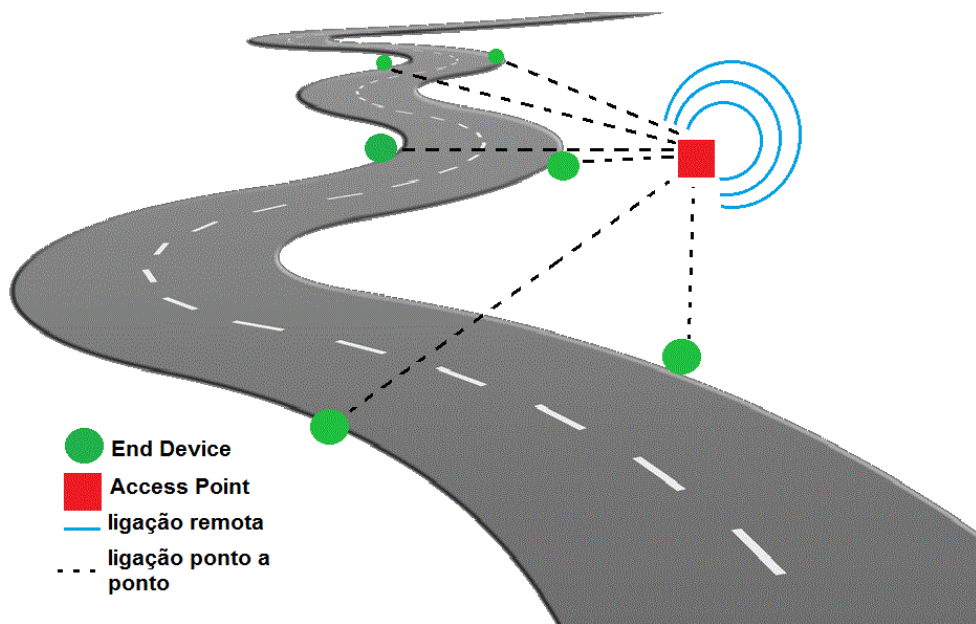


Figura 3.4-Ilustração da topologia em estrela aplicada ao problema

Tendo em conta a topologia apresentada, a interação entre os diferentes nós da WSN, quando é detetada uma colisão, é representada na Figura 3.5.

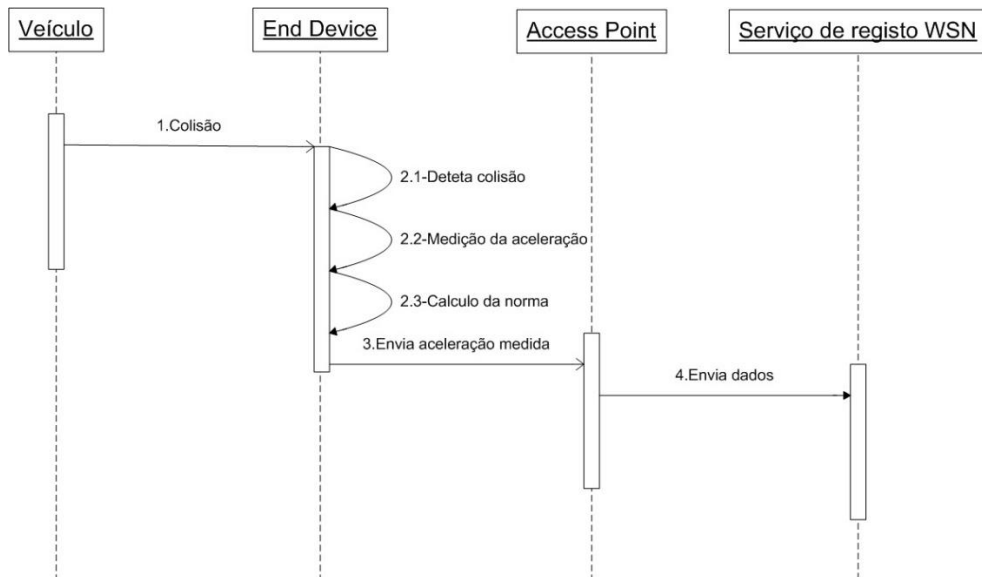


Figura 3.5-Diagrama sequencial do funcionamento da WSN

Após a ocorrência de uma colisão (1), o *ED* tem como tarefas a detecção da mesma (2.1), através de uma variação do acelerómetro, seguindo-se a medição do valor da aceleração (2.2). Com a leitura dos três eixos, é feito o cálculo da norma da aceleração (2.3), de seguida é enviada para o *AP* (3). Este por sua vez envia os dados de todos os *EDs* que monitorizaram a colisão para o SRWSN.

### 3.5 Estudo e seleção dos componentes

Para a implementação dos nós, é necessário seleccionar alguns componentes, como o SoC, uma unidade de energia, a caixa de proteção para a PCB criada, e no caso dos nós ED, um acelerómetro para monitorização das acelerações nas guardas. São ainda necessários mais componentes eletrónicos na conceção dos nós, sendo esses componentes: resistências, condensadores, bobines e alguns integrados entre outros. Os quais serão apresentados no capítulo 4 (§4.3), na apresentação do *hardware* desenvolvido.

#### 3.5.1 System-on-Chip (SoC)

Dois dos componentes essenciais. Com esse intuito foi seleccionou-se um *System-on-Chip (SoC)*. A grande vantagem reside no facto de, por estar tudo integrado num único *Chip*, as dimensões sejam mais reduzidas e haja uma maior eficiência energética.

O *SoC* seleccionado foi o *CC2530* da *Texas Instruments*, tal como ilustra a figura 3.6.



Figura 3.6 SoC CC2530 da *Texas Instruments* no package QFN40

Tendo ainda todos os periféricos e GPIO suficientes para a aplicação que se pretende desenvolver. É também de referir a capacidade *low power* deste SoC, sendo que em *power mode 3* consome apenas 0,4µA. Na tabela 3.2 estão listados os vários modos de funcionamento do SoC e os respetivos consumos.

**Tabela 3-2-Consumos de energia do CC2530 (datasheet)**

Modo	Descrição	Consumo
Com RX ativo	CPU adormecido	24mA
Com TX ativo 1dBm	CPU adormecido	29mA
<i>Power mode 1</i>	Acorda em períodos de 4us	0.2mA
<i>Power mode 2</i>	Configurável utilizando o <i>sleep timer</i>	1uA
<i>Power mode 3</i>	Interrupção externa	0.4 uA

### 3.5.2 Seleção do acelerómetro

Os acelerómetros selecionados para este projeto são os acelerómetros MEMS da *STMicroelectronics*. Estes acelerómetros têm como característica, serem de baixo consumo energético (*low-power*), digitais, interface SPI e I<sup>2</sup>C, resolução de 16 bits e permitem medir acelerações de ±2g a ±400g. Na tabela 3.3 estão listados os acelerómetros compatíveis com o *hardware* desenvolvido.

**Tabela 3-3- Acelerómetros selecionados**

Modelo	Escala
<i>LIS331DLH</i>	±2g ±4g ±8g
<i>LIS331HH</i>	±6g ±12g ±24g
<i>H3LIS331DL</i>	±100g ±200g ±400g

Com a possibilidade de conjugar estes vários acelerómetros ao *hardware* desenvolvido, sendo que apenas divergem na escala de aceleração, possibilita uma alteração rápida entre eles, sem ser necessário redesenhar *hardware*, e aguardar pela



sua fabricação e montagem. Os testes de comunicação e familiarização com esta família de acelerómetros serão feitos com o *LIS331DLH*.

### 3.5.3 Bateria

Dos vários fabricantes de baterias para aplicações industriais, tais como a *Varta*, a *Sharp*, a *Saft Batteries* ou a *Sanyo*, o fabricante escolhido foi a *Saft Batteries*, devido às utilizações anteriores bem sucedidas pelo grupo. Sendo que da vasta gama oferecida pelo fornecedor, as baterias seleccionadas foram as *SAFT LS17500 3PF*, as quais podem ser visualizadas nas figuras 3.7. foram seleccionadas devido às suas características, nomeadamente o tamanho reduzido (5cm x 1,7cm), sendo que possuem uma tensão de 3.6 Voltes aos seus terminais, com uma capacidade de 3.4Ah. Tendo ainda uma gama de temperaturas de funcionamento elevado indo de -60 a +85 Graus Celcius. Suportando temperaturas até 120 Graus Celcius.



Figura 3.7- Bateria *LS17500 (Li-SOCl<sub>2</sub>)* da *Saft Batteries*

### 3.5.4 Caixa de proteção

Foram seleccionadas duas caixas de proteção que oferecem maior robustez e impermeabilidade. Uma primeira mais pequena e reforçada com *IP66* e com dimensões (89x89x55mm) de modelo *1555E* do fabricante *Hammond Manufacturing<sup>TM</sup>*, a qual pode ser visualizada na figura 3.8 (A). A segunda, com *IP56*, é uma caixa de dimensões (100x100x50mm) de modelo *EC480C4* fabricada por *ECelettrocanali<sup>®</sup>*, esta mesma caixa pode ser visualizada na figura 3.8 (B).

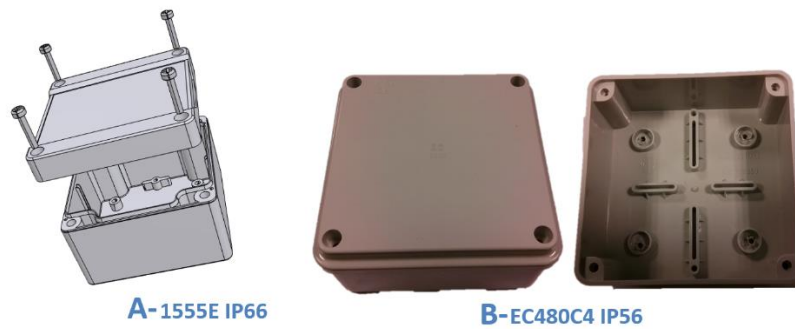


Figura 3.8- Caixas selecionadas para proteção dos nós

Quanto à impermeabilidade, ambas as caixas têm fator (IPx6), que indica que podem ser alvos de poderosos jatos de água com qualquer ângulo em relação à caixa, sem que o conteúdo sofra danos. Nesta aplicação os nós tem como destino serem colocados nas infraestruturas rodoviárias. Estando sujeitos a todo o tipo de chuva, logo esta proteção é necessária e suficiente.

### 3.6 Modelo 2D e 3D das guardas de segurança

Para efeitos de simulação foram desenvolvidos modelos em *Computer-aided Design (CAD)*, baseados nas plantas fornecidas pela empresa Metalgalva das barreiras de segurança: “calha tipo W 4M Prumo C125”, as quais podem ser consultadas em detalhe no Apêndice A.

#### 3.6.1 Modelo 2D

O modelo em duas dimensões tem como finalidade ser uma versão muito simplificada da estrutura. Esta simplicidade reflete-se na facilidade de criação da malha (*mesh*), componente do método de elementos finitos (FEM), possibilitando uma análise mais rápida e simples de uma guarda de segurança com um grande comprimento. Foram criados modelos com diversos comprimentos, entre 40 a 100 metros, com distâncias entre prumos de 2 e 4 metros. Na figura 3.9 é apresentado o modelo criado (as dimensões estão representadas em milímetros).

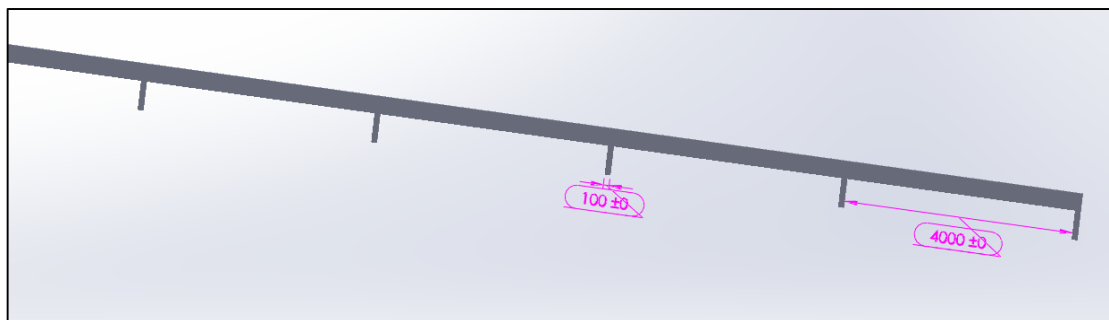


Figura 3.9-CAD do modelo 2D das Guardas de segurança

### 3.6.2 Modelo 3D

Para uma simulação mais próxima da realidade, foi desenvolvido um modelo à escala com as formas e os constituintes que compõe as guardas de segurança. Na figura 3.10 são representados várias perspectivas e detalhes do modelo 3D, onde é possível ver as componentes viga em W, prumo e amortecedores devidamente fixados por parafusos, anilhas e porcas M16. Este modelo pode ser consultado com maior detalhe no Apêndice B.

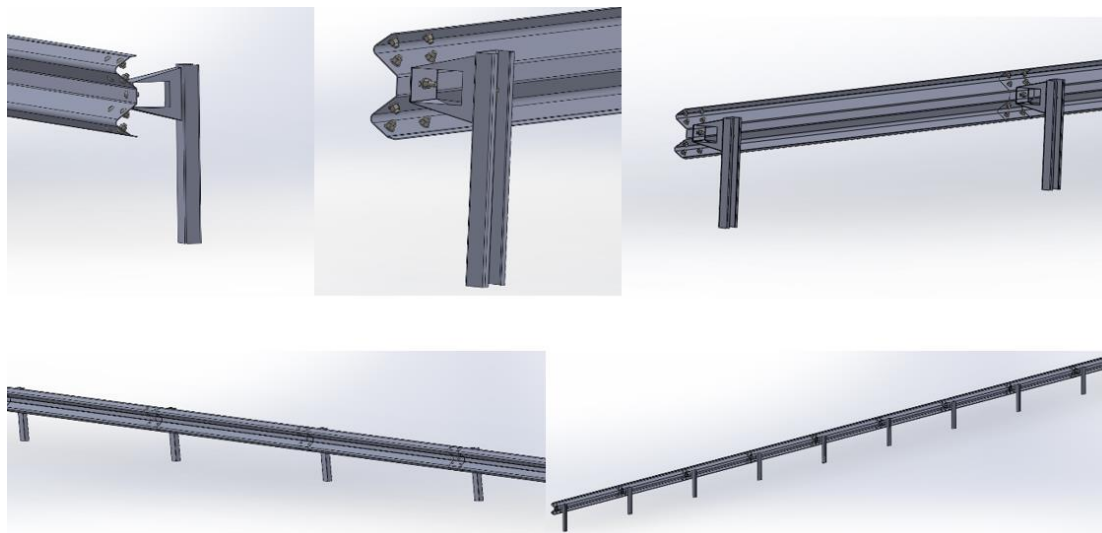


Figura 3.10-CAD do modelo 3D das Guardas de segurança

### **3.7 Ferramentas**

Para a realização desta dissertação é necessário utilizar diversas ferramentas informáticas, com diversos propósitos. Para a execução das simulações foram feitos os modelos em CAD na ferramenta *SolidWorks* 2012. Estes modelos são associados à ferramenta Ansys 12.0 onde são realizadas as várias simulações. Os cálculos e gráficos são realizados nas ferramentas *MatLab* 2012 e Excel 2013. Para a programação dos SoC cc2530, são necessárias as ferramentas IAR, *SmartRF Studio7*, *SmartRF Flash Programmer* e *SmartRF Packet Sniffer* e ainda a Stack selecionada *SimpliciTI*. Para a criação da aplicação Desktop é necessário a ferramenta *Visual Studio 2012* para programar na linguagem C#. No desenvolvimento das PCBs, as ferramentas utilizadas são *Eagle*, *Altium* e *CadStar*. Na criação de relatórios e apresentações intermédias, incluindo este documento final são utilizadas as ferramentas incluídas no Microsoft Office 2013.

### **3.8 Resumo**

Neste capítulo foi apresentada a modelação do sistema proposto nesta dissertação. Onde é incluído uma comparação com as abordagens já existentes na atualidade, uma descrição do funcionamento e as vantagens do sistema que é pretendido criar. Após feita esta análise, é possível iniciar o desenvolvimento do sistema.

## 4. Desenvolvimento do Sistema

Neste capítulo será apresentado todo o desenvolvimento do sistema, começando com as simulações efetuadas na ferramenta Ansys, seguindo-se a implementação das comunicações existentes no sistema. Foram ainda desenvolvidos *hardware* e *software*, os quais são explicados nestes mesmo capítulo.

### 4.1 Simulações das colisões através de elementos finitos

A ferramenta de *Computer-aided Engineering* (CAE) utilizada para esta etapa do projeto foi o *software* de simulação Ansys 12, este permite simular os efeitos da colisão ao longo do tempo.

O método dos elementos finitos é uma das técnicas mais poderosas e populares na engenharia atual, sendo que permite projetar e analisar estruturas complexas [15] [16]. No geral, os modelos experimentais estão limitados pelo tamanho, custo, complexidade e outros fatores que impedem a análise laboratorial como são necessários para muitos casos. Outra aproximação são os modelos teóricos, os quais podem ser mais generalizados, mas as suas soluções estão limitadas à geometria e condições fronteiras relativamente simples. A solução passa pelo desenvolvimento de elementos finitos, tornando-se bastante importante na análise e modelização de estruturas.

### 4.1.1 Propriedades físicas do aço galvanizado

O conhecimento do material que compõe as guardadas de segurança e das suas propriedades é indispensável para efetuar as simulações. As guardas são construídas em aço galvanizado, as principais características deste material podem ser consultadas na tabela 4.1. Estas características são necessárias para a ferramenta *Ansys*, a qual relaciona a estrutura a ser simulada com o respetivo material, possibilitando ao programa calcular todos os parâmetros para efetuar a simulação.

Uma característica importante é o amortecimento o qual tem uma grande influência no comportamento de todo o sistema. Em análises dinâmicas é fundamental especificar o amortecimento, para tal a ferramenta *Ansys* tem disponíveis as seguintes formas de amortecimentos, referidos no documento [17](§5.9.3):

- *Alpha and Beta Damping( Rayleigh Damping)*
- *Material-Dependent Damping*
- *Constant Material Damping Coefficient*
- *Constant Damping Ratio*
- *Modal Damping*
- *Element Damping*

É possível particularizar mais do que uma forma de amortecimento, sendo que o programa irá formular o amortecimento matricial (*Damping matrix*), uma vez que a soma de todos as formas de amortecimentos especificadas. As várias formas de amortecimento anteriormente listadas podem ser caracterizadas dependendo do método de análise em uso. No nosso caso é uma análise do tipo Transiente estrutural, na qual podemos especificar o coeficiente de amortecimento de *Rayleigh*. Para a inserção deste coeficiente na ferramenta *Ansys*, é necessário determinar os valores de *Alpha Damping* e *Beta Damping*, estes parâmetros são usados para definir as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  do amortecimento de Rayleigh.

Tabela 4-1-Propriedades do Aço Galvanizado

Propriedade	Valor
Density	7850 kg.m-3
Internal Damping	1,8x10-3 $\xi$
Mass-Matrix Damping	0,003 $\xi$
K-Matrix Damping	2e-6 $\xi$
Young's Modulus	2e11 Pa
Poisson's Ratio	0,3 (sem unidades)
Damping Ratio	0,001 a 0,002 (sem unidades)

O amortecimento matricial (C) é calculado através do uso das constantes  $\alpha$  e  $\beta$ , multiplicadas pela massa matricial(M) e pela rigidez matricial(K) respetivamente. A equação seguinte demonstra o cálculo do amortecimento matricial:

$$(C) = \alpha(M) + \beta(K)$$

O cálculo do amortecimento matricial é feito pela ferramenta Ansys, a qual tem os comandos ALPHAD e BETAD para ser especificado os valores de  $\alpha$  e  $\beta$ . Os valores não são conhecidos diretamente, mas podem ser calculados pela seguinte equação, onde  $\xi_i$  é a taxa de amortecimento modal e  $\omega_i$  é a frequência natural.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$$

Em muitas análises práticas estruturais, o amortecimento alfa pode ser ignorado ( $\alpha=0$ ). Nestes casos, pode-se calcular beta sabendo os valores de  $\xi_i$  e  $\omega_i$  com a seguinte equação:

$$\beta = \frac{2\xi_i}{\omega_i}$$

Para especificar as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  para uma determinada taxa de amortecimento  $\xi$ , é geralmente assumido que a soma de  $\alpha$  e  $\beta$  é praticamente constante durante um intervalo de frequências como se pode observar na figura 4.1.

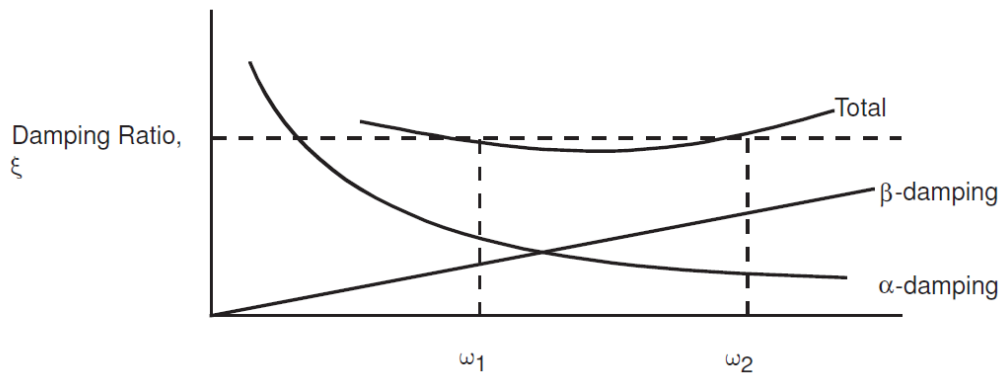


Figura 4.1- Rayleigh Damping

### 4.1.2 Testes à ferramenta Ansys

A ferramenta Ansys sendo uma ferramenta de simulação, torna necessário comprovar a sua precisão e fiabilidade. Nesta ferramenta são postos em prática simulações em que por vezes na realidade, nem sempre é possível realizar facilmente testes e obter valores. Sendo o caso, no qual não é possível criar colisões reais entre veículos e guardas de segurança e efetuar as medições. Assim sendo não é possível comparar as simulações com a realidade diretamente.

Como primeira aproximação e familiarização com a ferramenta, foram executadas simulações mais simples, simulações essas que permitem obter os valores teóricos através de cálculos.

#### 4.1.2.1 Simulação de uma massa suspensa por duas molas

A uma massa suspensa por duas molas foi aplicado uma força no sentido perpendicular às molas. O sólido é composto pela massa de forma cúbica e por duas molas colocadas lateralmente, em lados opostos do cubo. Na figura 4.2 é possível observar o sólido em questão assim como as suas dimensões em milímetros.



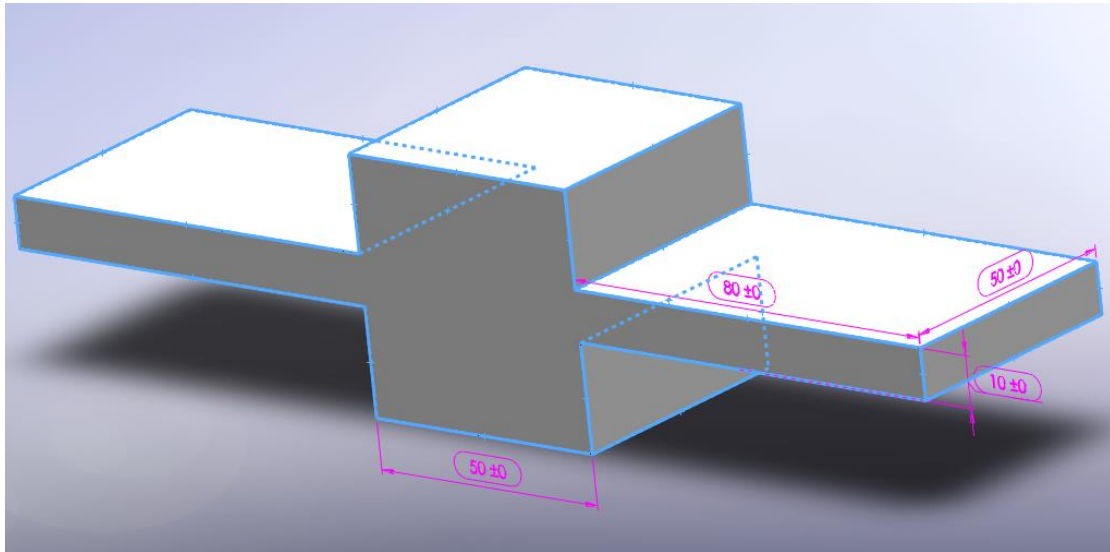


Figura 4.2-CAD em 3D da massa suspensa por molas

Os dados que pretendemos retirar são a frequência de ressonância e o período, para isso foram efetuados cálculos a fim de determinar esses mesmos valores. Na tabela 4.2 estão listados os valores iniciais e as dimensões do modelo, os quais podem ser visualizadas também na imagem 4.2.

Tabela 4-2- Condições iniciais do ensaio Massa suspensa por molas

Descrição	Valor
Espessura (Esp)	0,05 Metros
Aresta do cubo (Lc)	0,05 Metros
Comprimento mola (Lm)	0,08 Metros
Altura da mola (Hm)	0,01 Metros
Young's Modulus (E)	200 GPa
Densidade do aço (d)	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Volume (v)	165cm <sup>3</sup>
Massa (m)	1,295Kg

De seguida é calculado o momento de inércia (I):

$$I = \frac{1}{12} \cdot \text{Esp. Hm}^3$$

$$I = 4,166e^{-9} \text{ Kg.m}^2$$

Com o momento de inércia é possível agora calcular a constante de amortecimento para uma mola (K):

$$K = \frac{12EI}{L_m^3}$$

$$K = 1,953e^7$$

Sendo duas molas, para o cálculo da frequência de ressonância o valor da constante de amortecimento é multiplicado por dois.

$$f_r = \left(\frac{1}{2}\mu\right) * \sqrt{\frac{2K}{m}}$$

$$f_r = 874\text{Hz}$$

Após obtenção do valor teórico de 874Hz, foi realizado com os mesmos valores iniciais uma simulação em Ansys através de elementos finitos. Como primeiro passo foi desenhado o corpo com a massa e as respectivas molas no *software* de CAD solidWorks (figura 4.2), de seguida é feito a importação para o Ansys. Segue-se a seleção do material e das suas propriedades físicas, no separador de *Engineering data*, de seguida é necessário criar a *mesh* do corpo, a qual pode ser visualizada na figura 4.3.

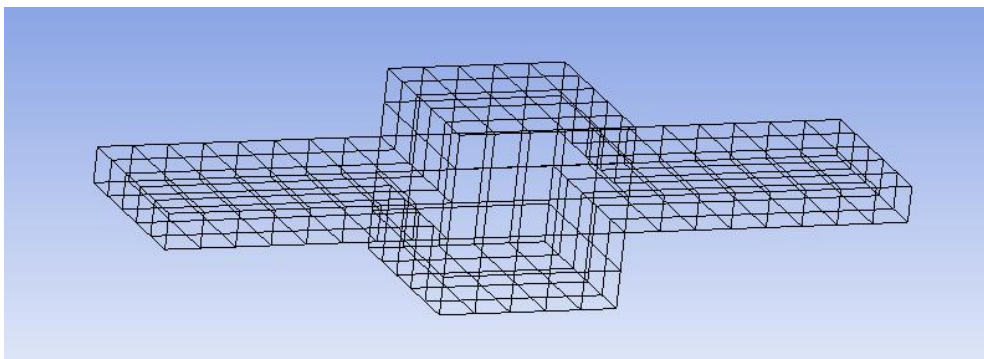
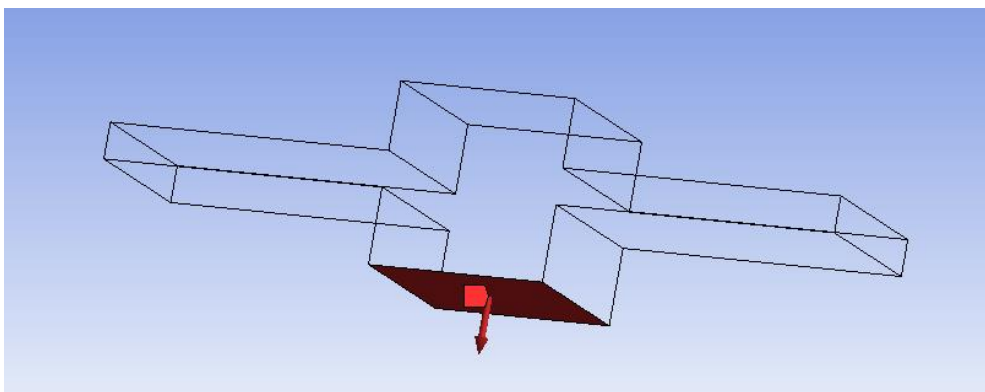


Figura 4.3-Mesh criada para o modelo massa suspensa por molas

Para conseguir determinar a frequência de ressonância é necessário aplicar um degrau de força por um curto período de tempo no modelo. Essa força é aplicada na face inferior da massa suspensa, como pode ser visualizado na figura 4.4. Este degrau de força cria uma alteração do estado de repouso, movendo a massa no seu sentido. Quando a força não é mais aplicada a massa vai criar um movimento oscilatório amortecido, possibilitando conhecer a frequência de ressonância. A frequência de ressonância é independente da força aplicada, pois essa força irá ter influência na amplitude da onda e no aumento do tempo de paragem.



**Figura 4.4- Aplicação de uma força na face inferior da massa suspensa**

Após definir a força com o valor de 100N, foi estabelecido o tempo amostrado, como também o número de amostras nesse mesmo período de tempo. Foi assim escolhido um tempo de 10ms com 300 amostras, pode ser observado na figura 4.5 a representação gráfica do modelo simulado na ferramenta *Ansys*, em que é representado por cores o deslocamento da estrutura, sendo as seções encarnadas as de maior deslocamento, e as azuis de menor deslocamento. Os pontos de fixação (os extremos das molas) são naturalmente as secções do modelo de menor movimento, e a massa ser a de maior movimento, estando a força aplicada na sua base.

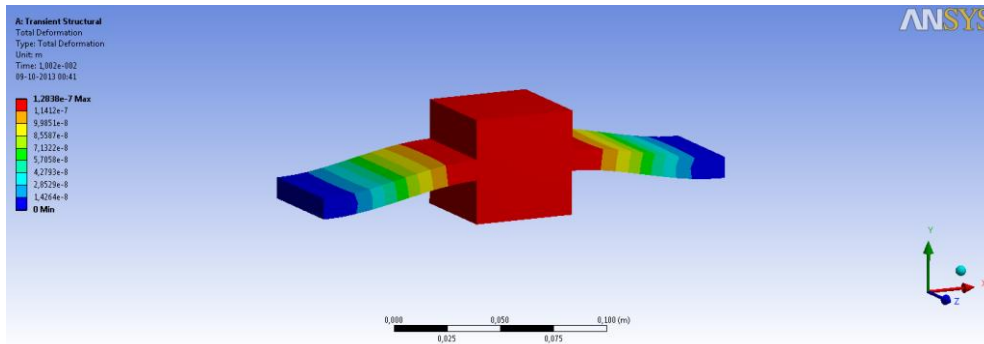


Figura 4.5- Representação do modelo na ferramenta Ansys

O resultado desta simulação pode ser visualizado na figura 4.6, a qual representa a onda criada pelo degrau aplicado ao modelo, o período obtido foi de  $1,14 \times 10^{-3}$  segundos, o que representa uma frequência de ressonância de 877Hz.

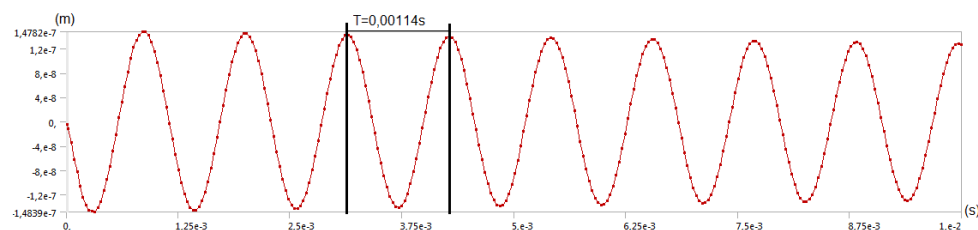


Figura 4.6-Gráfico da oscilação da massa suspensa

Pode-se concluir que a simulação obteve valores muito próximos dos valores calculados anteriormente, sendo o valor da frequência de ressonância calculado de 874Hz e o simulado de 877Hz, o erro é de apenas 0,34%, o que indica que a simulação foi realizada de uma forma correta.

#### 4.1.2.2 Simulação de uma viga retangular a oscilar

Foi ainda feito mais um teste para verificar a fiabilidade do programa de simulação Ansys. O qual consiste em criar uma viga retangular que pode ser observada na figura 4.7. Neste caso é aplicado uma força numa extremidade da mesma, tendo a outra extremidade fixa. Fazendo com que esta dobre e oscile até parar. Possibilitando assim determinar a frequência de ressonância da viga.

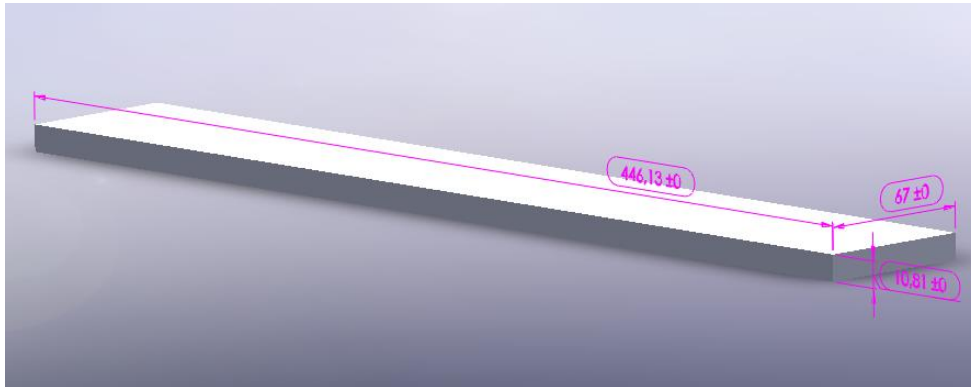


Figura 4.7-CAD em 3D de uma viga retangular

De igual modo ao teste anterior, são calculados os valores teóricos. As condições iniciais para este teste podem ser consultadas na tabela 4.3.

Tabela 4-3-Condições iniciais do ensaio de uma viga a oscilar

Descrição	Valor
Espessura (Esp)	0,067 Metros
Comprimento (L)	0,446 Metros
Altura (H)	0,011 Metros
Young's Modulus (E)	200 GPa
Densidade do aço (d)	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Volume (v)	323cm <sup>3</sup>
Massa (m)	2,537Kg

De seguida é calculado o momento de inércia (I):

$$I = \frac{1}{12} \cdot \text{Esp} \cdot H^3$$

$$I = 7,053e^{-9} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Com o momento de inércia é possível agora calcular a constante de amortecimento para uma mola (K):

$$K = \frac{12EI}{L^3}$$

$$K = 1,953. e^7$$

Sabendo o valor da constante de amortecimento da viga, é agora possível determinar a frequência de ressonância ( $f_r$ ):

$$f_r = \left(\frac{1}{2} \mu\right) * \sqrt{\frac{K}{m}}$$

$$f_r = 43.6Hz$$

Seguidamente foi realizado o ensaio na ferramenta *Ansys*, seguindo os mesmos passos do ensaio anterior, onde é escolhido o material que compõe a viga, sendo ele como já referido o aço. Segue-se a criação da mesh, a qual foi definida com elementos de 1milimetro. O tempo para esta simulação foi definido com 0,5 segundos sendo apresentado os resultados em 500 amostras. Na imagem 4.8 é possível visualizar a viga no ambiente gráfico da *Ansys*, após a aplicação de 100N de força na sua extremidade.

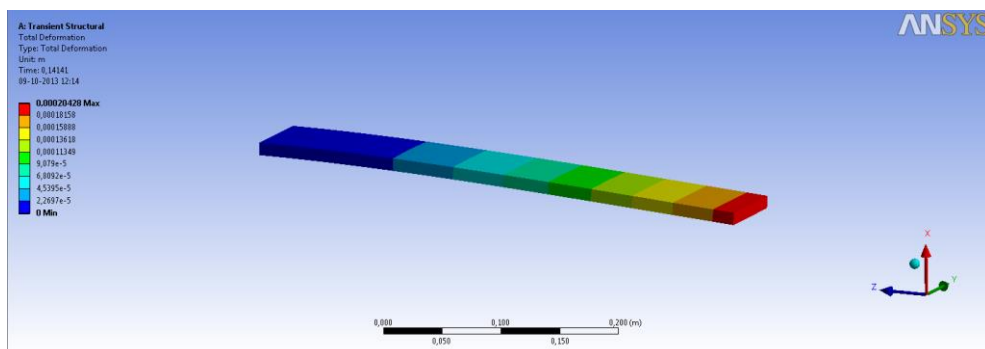


Figura 4.8-Representação da viga na ferramenta Ansys

O resultado da simulação pode ser observado na figura 4.9, onde é possível analisar a forma da onda criada pela oscilação da viga. O período obtido é de 22 milissegundos, o que representa uma frequência de ressonância de 43,6Hz. Comparativamente ao valor calculado anteriormente, pode-se verificar que coincidem.

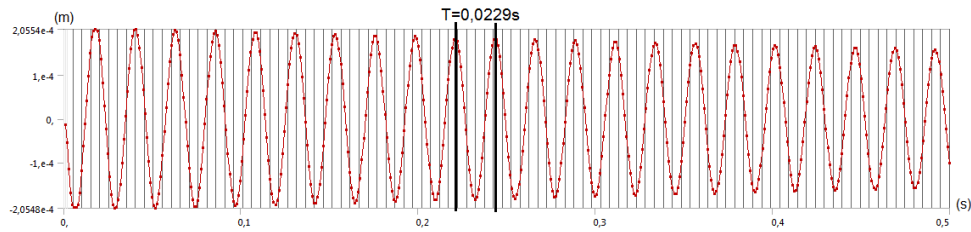


Figura 4.9- Gráfico da oscilação da viga

Podemos concluir com estes dois testes que a ferramenta mostra-se bastante precisa, pois obteve-se, em ambos os ensaios, valores muito próximos dos calculados, tendo este último teste coincidido. Significando que as simulações estão a ser bem conseguidas.

#### 4.1.3 Simulações efetuadas com o modelo 2D

Com a simulação em 2D, é pretendido calcular a velocidade de propagação da onda de choque, a qual surge da colisão nas guardas de segurança. Foi criado um modelo CAD com 100 metros de comprimento. Após importação para o Ansys é criada a *mesh* para a estrutura, que pode ser observada na figura 4.10. De seguida são definidos os pontos fixos, sendo eles as extremidades que representam a parte inferior dos prumos metálicos.

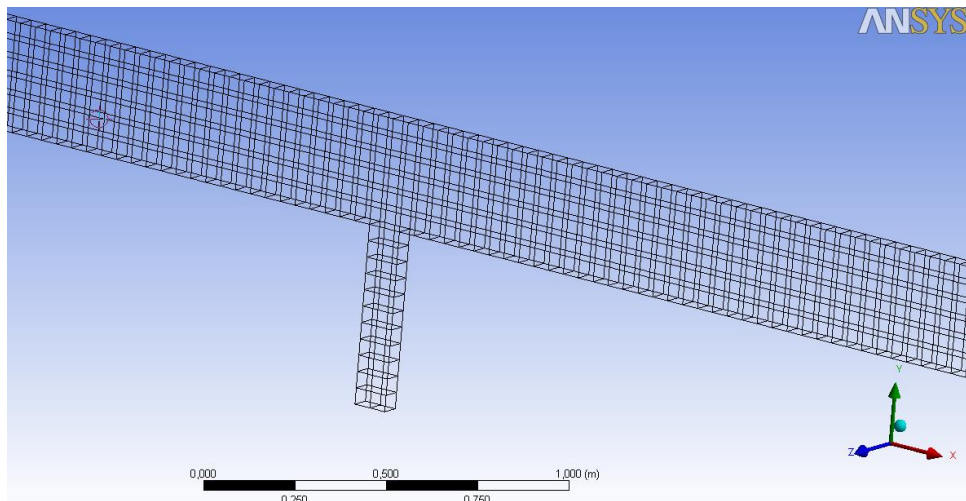


Figura 4.10-Mesh criada para o modelo 2D

Após calculado o vetor da força da colisão em módulo e direção, esse mesmo vetor é aplicado a um ponto do modelo, neste caso aplicado ao último prumo da estrutura, na interceção com a viga. Sendo introduzido um degrau de 10 milissegundos com os valores calculados para cada componente (X,Y,Z). Para calcular a força de colisão de uma viatura na guarda de segurança, é necessário conhecer à partida alguns dados, como a velocidade inicial, velocidade final, peso e tempo de colisão. Depois da análise dos relatórios realizados às colisões reais por parte da *Texas Transportation Institute* [18] [19] [20], foi possível fazer o levantamento desses dados. As figuras 4.11 e 4.12 ilustram a seqüência de colisão de uma viatura de 2175kg a embater a uma velocidade de 100 Km/h com um ângulo de 24,8°. Sendo apontado no relatório, que os ângulos mais comuns em colisões com as guardas de segurança são em torno deste valor.



**Figura 4.11-Teste em guarda de segurança de betão [19]**



**Figura 4.12-Teste em guarda de segurança metálico [19]**

O tempo de colisão revela ser aproximadamente dos 0,5 segundos, sendo ainda mencionado que a velocidade final do veículo é de 82km/h. Com base nestes valores e nos restantes dados dos relatórios [18] [19] [20], foi criado a tabela 4.4, a qual apresenta a força nas componentes X e Y inseridas na ferramenta Ansys, criando assim a força de amplitude e ângulo desejado.

Para tal, sendo:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



$$a = \frac{v_f - v_i}{\Delta t}$$

Por sua vez:

$$F = m \cdot a$$

Substituindo:

$$F = m \cdot \frac{v_f - v_i}{\Delta t}$$

Tendo em conta o ângulo da colisão:

$$F = \text{sen}(\alpha) \cdot m \cdot \frac{v_f - v_i}{\Delta t}$$

Podemos assim calcular a força aplicada na guardada de segurança.

**Tabela 4-4- Cálculo da força aplicada na guarda de segurança**

<b>Peso da viatura</b>	<b>Ângulo</b>	<b>Velocidade inicial</b>	<b>Velocidade final</b>	<b>Força em X</b>	<b>Força em Y</b>
3500kg	24.8°	100Km/h	82km/h	22592N	48894N
3500kg	24.8°	10Km/h	5Km/h	4078N	8826N
1000kg	24.8°	100Km/h	82km/h	4195N	9078N
1000kg	24.8°	10Km/h	5Km/h	1165N	2522N

Na figura 4.13 é possível visualizar o interface gráfico com a representação da guarda de segurança a simular na sua dimensão total.

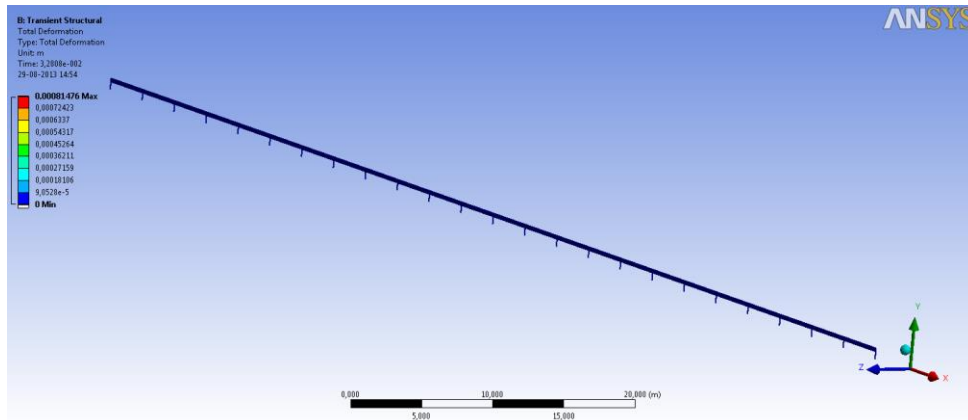
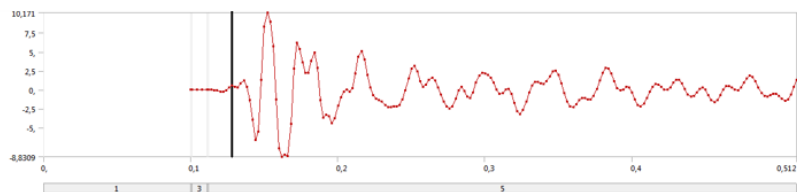


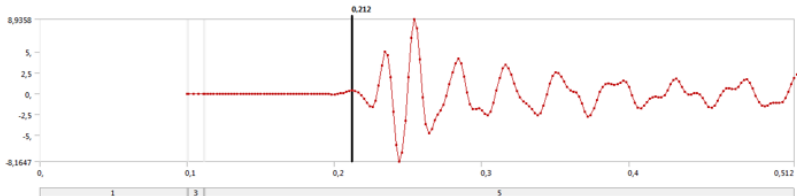
Figura 4.13-Interface gráfico do Ansys

Os dados obtidos nesta simulação são apresentados na figura 4.14, onde pode ser consultado a aceleração presente em vários pontos da estrutura.

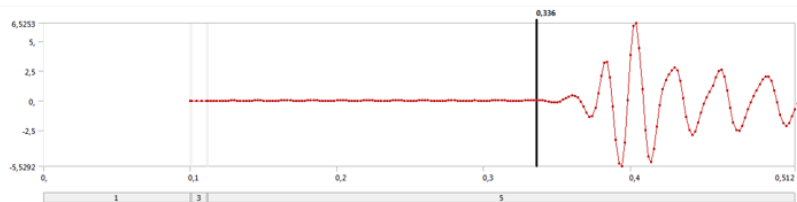
12 Metros do ponto de Colisão



36 Metros do ponto de Colisão



76 Metros do ponto de Colisão



96 Metros do ponto de Colisão

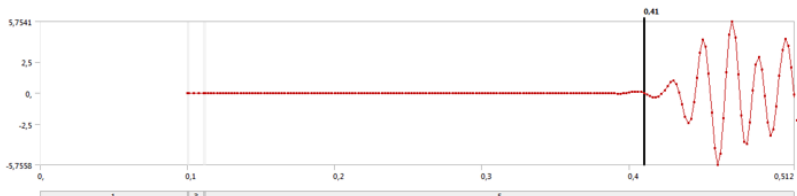
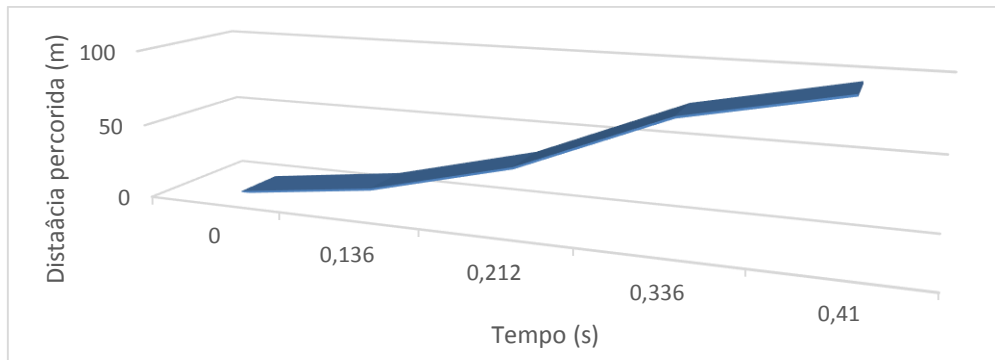


Figura 4.14-Dados da simulação ao longo do tempo após a colisão

Na figura 4.15 é apresentado o gráfico do tempo de propagação da onda de choque. Relacionando o tempo após a colisão com o momento em que atinge os pontos monitorizados referidos na figura 4.14.



**Figura 4.15-Gráfico de propagação da onda de choque na guarda de segurança**

Através destes dados é possível calcular a velocidade da onda de choque, a qual atravessa a guarda de segurança a uma velocidade de  $320\pm 5\text{m/s}$ , sendo  $1150\text{km/h}$ .

#### **4.1.4 Simulações efetuadas com o modelo 3D**

Para uma melhor aproximação à realidade, foi realizada uma série de simulações sobre o modelo 3D anteriormente apresentado no capítulo III. Na sequência destas simulações, são procuradas informações como a frequência de ressonância das ondas de choque, de forma a estipular o período de amostragem no qual o sistema deverá operar. Melhorando assim o desempenho e o consumo de energia, e por sua vez a vida dos dispositivos. É ainda desejado conhecer a amplitude de aceleração criada nas guardas de segurança pela onda de choque ao longo da mesma.

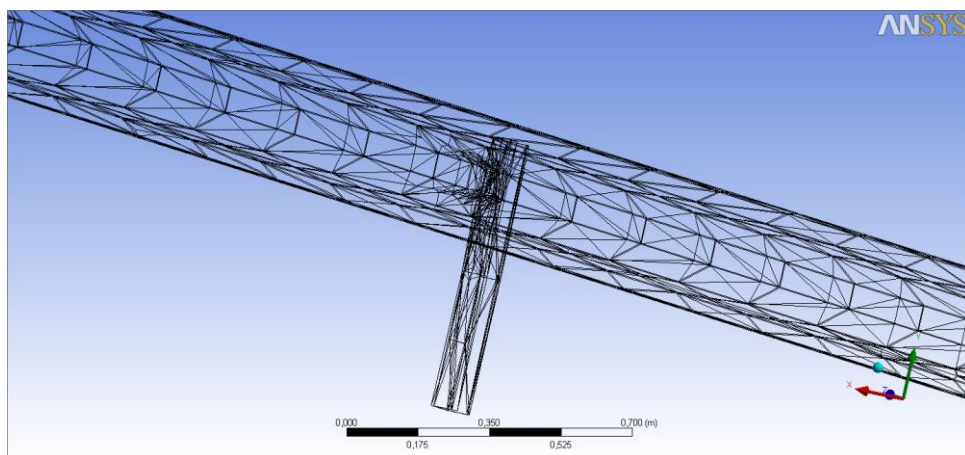


Figura 4.16-Mesh criada para o modelo 3D

Com algumas alterações a ferramenta Ansys, procedendo de modo similar à simulação 2D anteriormente apresentada, é criada a *mesh* que pode ser visualizada na figura 4.16. Na figura 4.17 está representado a estrutura 3D na ferramenta Ansys, podendo ser observado no apêndice C uma imagem com maiores dimensões.

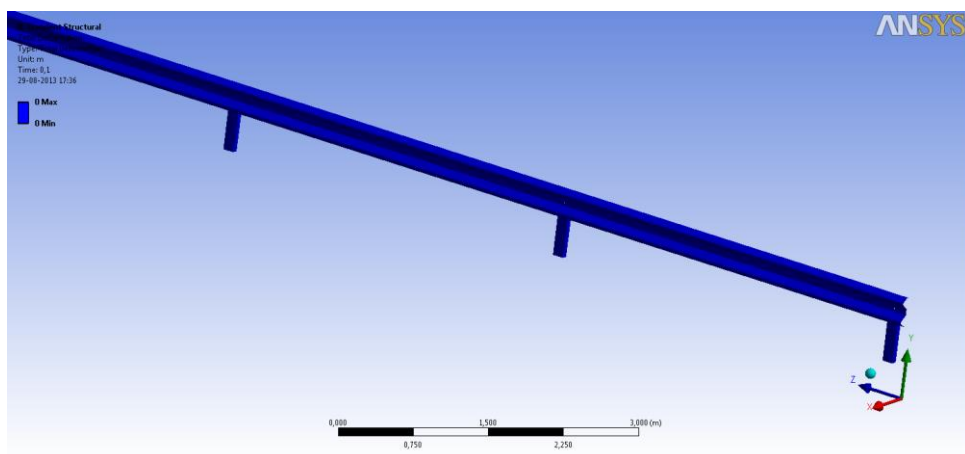


Figura 4.17-Representação gráfica do Modelo 3D no Ansys

Foram efetuadas várias simulações, correspondentes aos casos descritos na tabela 4.4. Os resultados das simulações, para melhor organização, podem ser consultados em forma de tabela, na tabela 4.5.

Tabela 4-5-Dados das simulações em 3D

Condições iniciais			Distância da colisão								
Peso	Velocidade	Angulo(°)	frequência(Hz)	período(s)	ACC (0m)	ACC (4m)	ACC (8m)	ACC (12m)	ACC (16m)	ACC (20m)	ACC (24m)
1000kg	10km/h	24.8	58,8	0,017	4.618g	3.932g	3.253g	3.163g	3.040g	2.959g	2.204g
1000kg	100km/h	24.8	58,8	0,017	16,032g	13.826g	12.833g	11.600g	10.925g	10.619g	9.990g
3500kg	10km/h	24.8	58,8	0,017	14.984g	13.975g	12.959g	11.342g	10.528g	9.228g	7,786g
3500kg	100km/h	24.8	58,8	0,017	66.021g	47.480g	44.260g	40.710g	38.34g	30.613g	21.747g

A fim de melhorar a simulação foi calculado as constantes  $\alpha$  e  $\beta$ , componentes necessárias para que a ferramenta possa calcular o amortecimento para esta estrutura. Baseando-se no documento [17] fornecido pela Ansys, para facilitar os cálculos  $\alpha$  foi igualado a zero, onde  $\beta$  pode ser calculado através da equação (1). Após efetuar algumas simulações de teste foi determinado que a frequência da estrutura é de 58,8Hz correspondendo a  $\omega_1$ . O valor de  $\xi_i$  (*damping ratio*) do aço é conhecido, estando listado na tabela 4.1. Em (2) é calculado a componente  $\beta$ , sendo depois introduzido no respectivo campo da ferramenta Ansys.

$$\beta = \frac{2\xi_i}{\omega_1} \quad (1)$$

Sendo  $\omega_1$  em radianos por segundo, 58,8Hz corresponde a 369,45rad/s:

$$\beta = \frac{2*0,002}{369,45} \quad (2)$$

$$\beta = 1,083e^{-5}$$

Para todas as simulações a frequência de ressonância obtida foi de 58,8Hz, sendo esta a frequência a qual deve de ser amostrada. Teoricamente a frequência de amostragem necessita de ser duas vezes superior a frequência que se pretende amostrar. Sendo que na boa pratica, idealmente para a obtenção de um sinal mais próximo do real, a frequência de amostragem deverá ser de 10 vezes a frequência do sinal a amostrar. Como tal a frequência de amostragem a utilizar é de 588Hz o que corresponde a um intervalo entre medições de 1,7 milissegundos.

## 4.2 Implementação das comunicações

Ao nível das comunicações, o sistema proposto tem a necessidade de comunicar entre nós ED e AP, e por sua vez o AP necessita de enviar os dados para o SRWSN. A comunicação entre nós é feita por uma rede local, com tecnologia *RF*. Esta rede é implementada através dos *SoC CC2530*, estando a comunicação controlada pela *Stack Simpliciti*. A comunicação entre o AP e o SRWSN nesta primeira aproximação é feita através de uma ligação por porta série a um PC desktop, o qual tem uma aplicação em C# (§4.4.3) responsável por monitorizar as colisões e de enviar os dados para a Base de Dados alojada na *Cloud*. Esta mesma base de dados é partilhada com o *WebSite*.

### 4.2.1 Topologia de rede

A topologia de rede escolhida para este sistema como anteriormente referido no capítulo 3 (§3.4), é a ligação em estrela, sendo criadas ligações ponto a ponto entre os ED e o AP. O diagrama sequencial da figura 4.18 demonstra a comunicação entre ED e o AP, onde um AP comunica com dois ED, denominados na figura como (X) e (Y). O AP cria uma ligação (1.1), onde aguarda pelo pedido de ligação de um ED a qualquer momento. O ED (X) emite uma mensagem de procura de ligação (2.1), a qual é logo atendida pois o AP está livre naquele momento, devolvendo uma mensagem a confirmar a ligação (1.2). Neste momento a ligação está estabelecida e só é terminada quando um dos nós o fechar ligação. Neste estado, são feitas as transferências de dados (2.2), com a respetiva confirmação de pacote recebido (*Acknowledged* (1.3)).

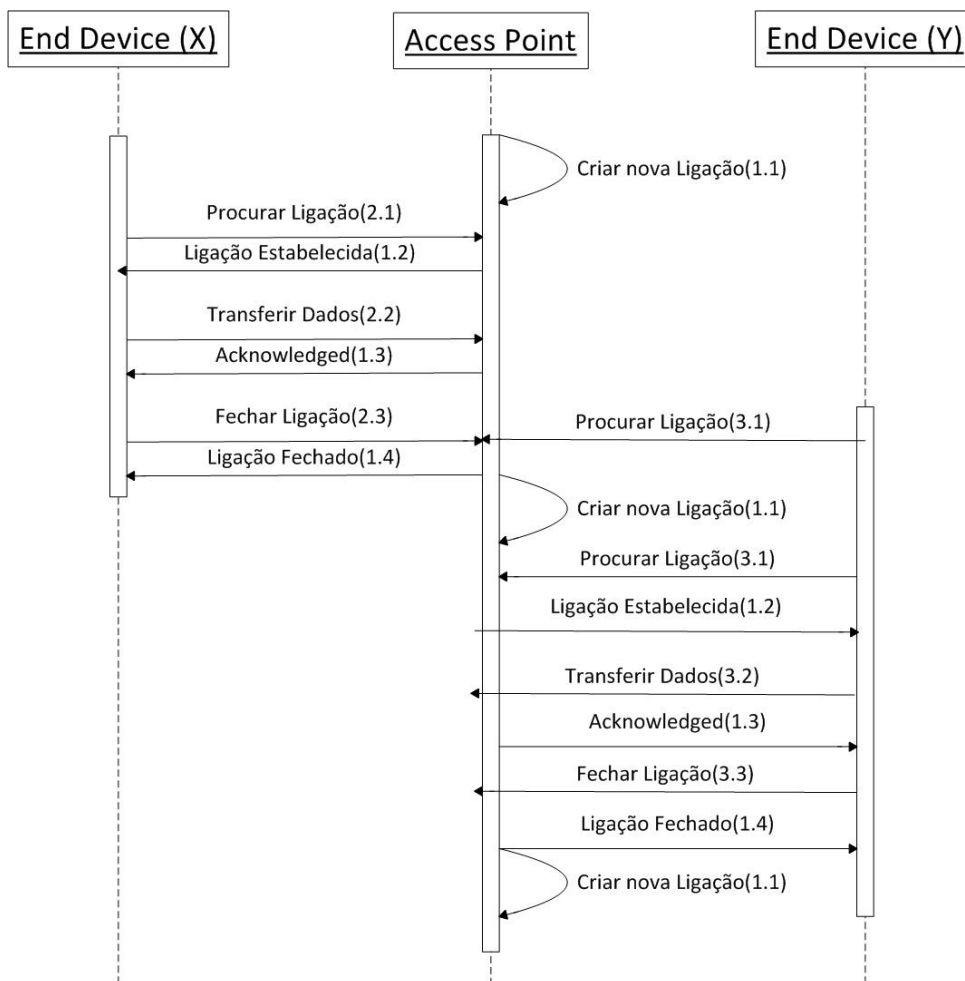


Figura 4.18-Diagrama sequencial de comunicação ponto a ponto

No fim da comunicação por parte do ED, este informa do fim da mesma pedindo o fim da ligação (2.3). O AP responde com a confirmação do fim da ligação (1.4). Nesse mesmo período de tempo um segundo ED (Y), pode iniciar um pedido de ligação ao AP, enviando pedidos periodicamente até o pedido ser atendido. Após obter a ligação ao AP, os passos são os mesmos anteriormente referidos para o ED (X). Na seção (§4.4.1) e na (4.4.2) são apresentados com mais detalhe as implementações das comunicações no nós ED e AP respetivamente.

## 4.2.2 Protocolo de comunicação

O sistema conta com comunicação entre os nós ED e os AP, este feito por RF na gama 2.4GHz com o protocolo de rede *SimpliciTI*. Estando ainda presente uma ligação UART ao PC desktop.

Na figura 4.19 esta representado a trama de comunicação implementada pela *SimpliciTI*, na qual os campos com (RD\*) são campos que dependem da frequência de radio utilizada, não da *SimpliciTI* [21]. Sendo no campo do *application payload* que são incluídos os dados a enviar na trama.

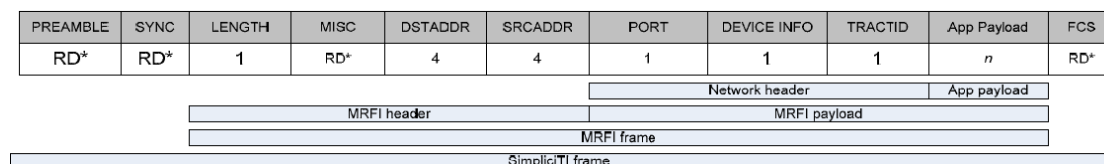


Figura 4.19-Formato da trama de comunicação da *SimpliciTI* [21]

Para possibilitar a leitura dos dados enviados no nó recetor, foi criado uma biblioteca comum a todos os nós. Na qual está definido uma estrutura de dados, a qual é enviada. Sendo que o recetor, no fim de receber uma trama válida, preenche essa mesma estrutura ficando com os mesmos dados que o emissor enviou. Na figura 4.20, é possível consultar a estrutura referida, estando ela composta com uma *flag* para identificar o tipo de mensagem a ser enviada, seguindo-se o valor da norma de aceleração calculado e por fim o endereço MAC do dispositivo que envia a trama.

```
typedef struct protocol{
    uint8_t flag;
    float Norma_aceleration;
    uint8_t mac_add[8];
}ae_proto;
```

Figura 4.20-Estrutura do protocolo de comunicação

Na comunicação com o AP e o Desktop por *UART*, é necessário definir as mensagens enviadas, para garantir a boa interpretação das mesmas. O sistema conta com três tipos de mensagens a comunicar, sendo;



- A primeira mensagem é de ativação, na qual o nó AP ou ED, após ser ligado, envia de imediato esta mensagem para informarem da sua ativação incluindo o seu endereço *MAC*, para ser registado.
- A segunda mensagem é respetivamente sobre a ocorrência de uma colisão, onde os nós ED enviam a norma da aceleração média nos três eixos. Incluindo o endereço *MAC*, mais uma vez para registo e o valor da aceleração calculado.
- Por último, a terceira mensagem destina-se aos registos periódicos de atividade, denominados de *Keep Alive*. Sendo nesta mensagem enviado o endereço *MAC*, para ser registado que o dispositivo está funcional no momento do envio da mensagem.

Nas seções (§4.4) serão apresentados mais detalhes sobre as comunicações anteriormente referidas, nomeadamente a gestão e criação das mensagens do sistema.

### **4.3 Hardware desenvolvido**

Para a realização deste sistema foi necessário a criação de *hardware*, dedicado para minimizar o espaço e a aumentar a robustez do sistema. Este *hardware* é focado na estrutura da WSN, isto é nos nós que a constituem. O processo iniciou-se com placas de desenvolvimento e teste, seguindo-se o desenvolvimento das placas dedicadas para este sistema.

#### **4.3.1 Placas de desenvolvimento**

Para uma primeira aproximação ao *SoC CC2530* e a *stack SimpliciTI*, foi utilizado *hardware* disponibilizado pelo grupo. Possibilitando assim uma rápida familiarização com a arquitetura do *SoC*, e com as ferramentas de programação. O respetivo *hardware* pode ser visualizado nas figuras 4.21,4.22 e 4.23, sendo a placa de desenvolvimento, o módulo de laboratório com o *CC2530* e o módulo *CC2530EM* original da *Texas Instruments*, respetivamente.

A placa de desenvolvimento *CC25xxDK* (figura 4.21) desenvolvida pelo grupo, é baseada na *SmartRF05EB* da *TI*, incluindo suporte para LCD, interface USB 2.0 e UART, como para *debug*, *LEDs* botões e *joystick*. Devido a ser baseado na *SmartRF05EB*, utiliza o mesmo *firmware* e podem ser utilizadas todas as aplicações e *software* da *TI*. É ainda suportado as mesmas famílias de *SoC*, nomeadamente:

- *CC25XXEM* com possibilidade de *boost* com *CC2590/Cc2591*
- *CC24XXEM* com possibilidade de *boost* com *CC2590/Cc2591*
- *CC11XXEM* com possibilidade de *boost* com *CC1190/Cc1191*
- *CCMSP-EM430F256*

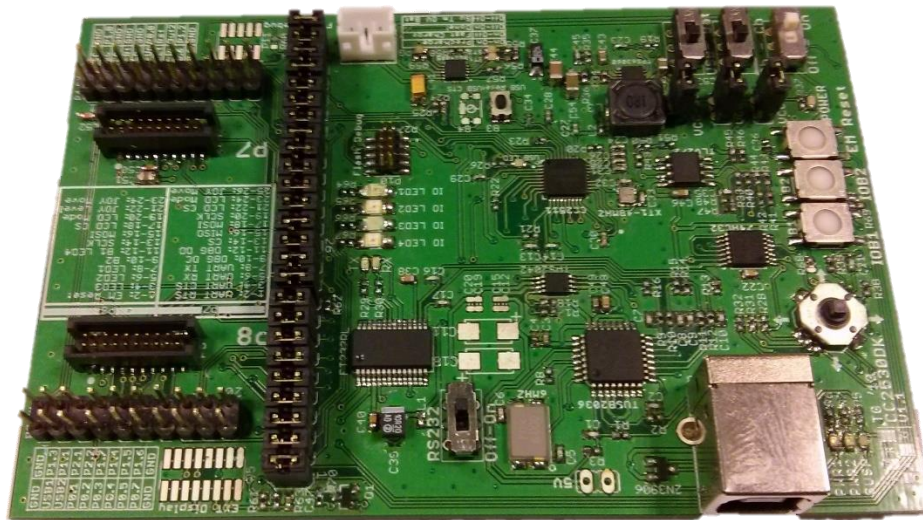


Figura 4.21- *CC25xx Development Kit*

A placa *CC2530EM* da figura 4.21 foi desenvolvida pelo grupo baseada na placa original da *TI*. Sendo ela compatível com os *SoC* *CC2530* e *CC2540/41*, comunicando ambos na frequência de 2.4GHz. Foi incluído uma antena na própria *PCB*, diminuindo as dimensões e os custos do módulo, estando ainda presente o conector para a antena externa em caso de necessidade como se pode ver na figura4.22.

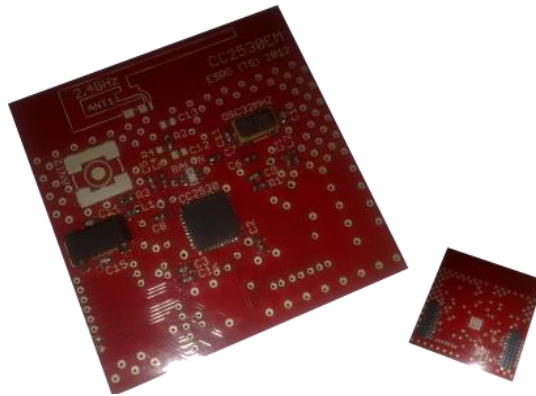


Figura 4.22-CC2530 Evaluation Module

Na figura 4.23, pode ser visualizado a placa original da *Texas Instruments*, na qual foi baseada a placa anteriormente apresentada da figura 4.22. Estando esta equipada com conector e uma antena exterior.



Figura 4.23- Original CC2530 Evaluation Module da *Texas Instruments*

Foi ainda desenvolvido uma placa para testes compatível com os acelerómetros da *STMicroelectronics* da tabela 3.3. Esta placa conta com os mesmos conectores utilizados pela *CC25xxDK* e *CC2530EM*, pois foi feita com o intuito de ser colocado entre estas duas placas. Criando assim uma “pilha”, permitindo no futuro a adição de mais periféricos, facilitando o desenvolvimento. Na figura 4.24 podem ser observadas as ligações recomendadas pelo fabricante, apresentadas no *datasheet* do acelerómetro.

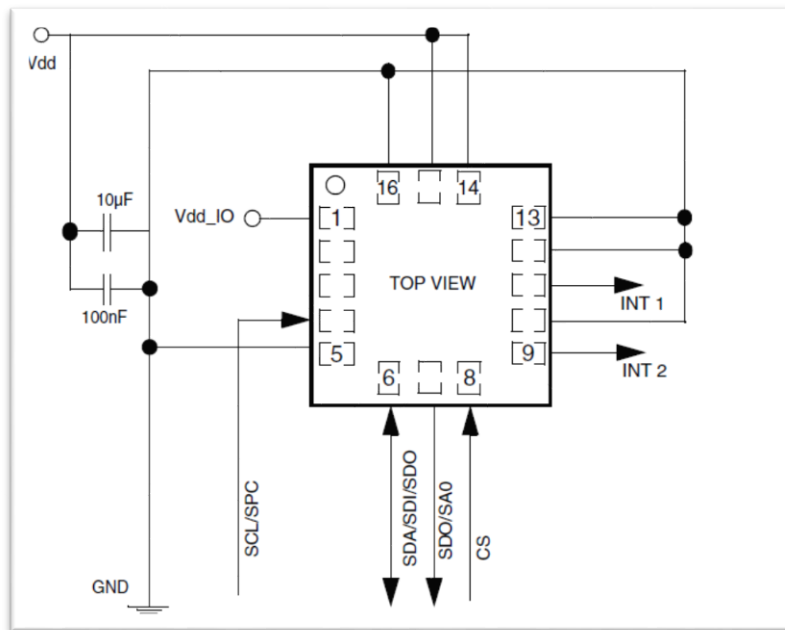


Figura 4.24-Ligações recomendadas pela *STMicroelectronics*

A *PCB* final pode ser visualizada na figura 4.25, onde é possível verificar a existência de conectores machos onde irá encaixar os módulos *CC2530EM*, e na parte inferior estão soldados um par de conectores fêmeas para encaixar na placa de desenvolvimento *CC25xxDK*. O acelerómetro por sua vez, está ao centro da *PCB*.



Figura 4.25- *PCB* para desenvolvimento dos acelerómetros *STMicroelectronics*

Com a montagem destas placas como é possível visualizar na figura 4.26, estando a *PCB* do acelerómetro entre o *CC2530EM* e a *CC25xxDK*. Utilizando vários conjuntos, possibilita o desenvolvimento do sistema de deteção de acelerações e a própria *WSN*.



Figura 4.26-CC25xxDK com acelerómetro e SoC CC2530EM

### 4.3.2 End Device

No *design* do *hardware* para os nós, foi levado em conta em primeiro lugar o espaço disponível nas caixas de proteção selecionadas. Nomeadamente as dimensões, mas também a forma e os pontos de fixação.

Os nós ED são constituídos por uma bateria SAFT LS17500 (§3.5.3), um acelerómetro digital (§3.5.2), um par de conectores para fixação dos módulos de comunicação. Incluindo ainda um led par *debug* ligado ao GPIO P1.1 e dois botões de pressão um de *reset* e outro ligado ao GPIO P0.1. Para facilitar a programação do SoC, foi incluído na PCB um conector *Flash Debug*, para não ser necessário remover o módulo sempre que for preciso fazer alterações ao código. O esquemático desta PCB pode ser consultado no Apêndice D. Na figura 4.27 podem ser visualizadas em 2D(A) e 3D(B) a PCB desenvolvida na ferramenta *Altium*. É ainda de salientar que a PCB inclui furos para fixação de ambas as caixas anteriormente referidas.

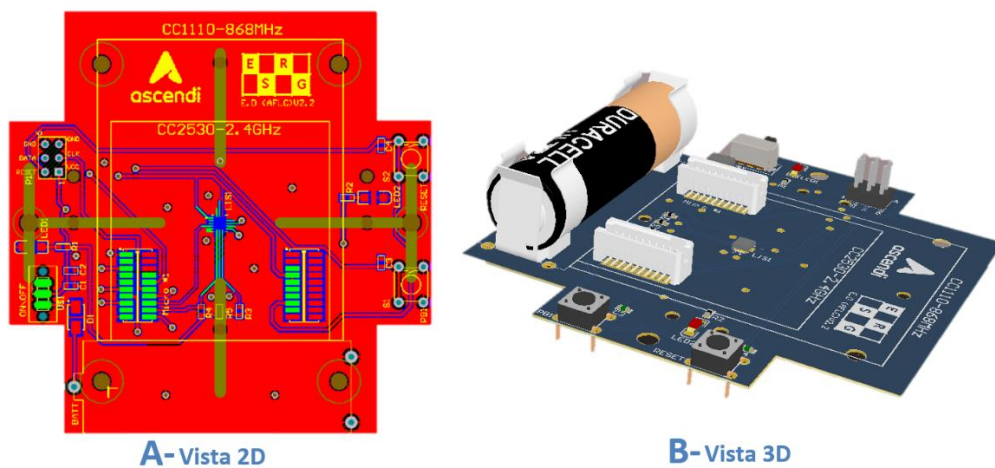


Figura 4.27-PCB desenvolvida para o nó *End Device*

Na figura seguinte (4.28), pode ser observar a PCB já assemblada com todos os componentes, com e sem o módulo *CC2530EM*.

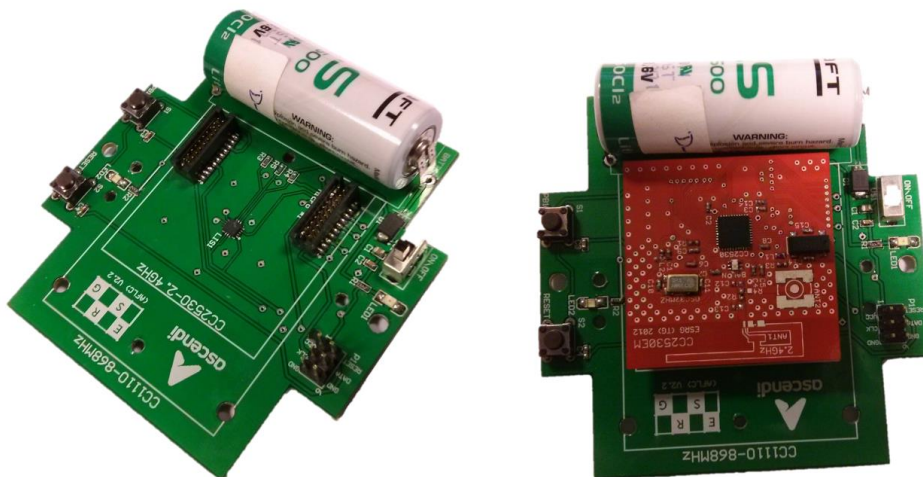


Figura 4.28-PCB do nó *End device* assemblada

Para comprovar a bom funcionamento da *PCB* desenvolvida, numa fase inicial, foi assemblado um primeiro protótipo. Com este protótipo procurou-se descobrir falhas e melhorias a corrigir na criação da *PCB* final. O protótipo pode ser visualizado na figura 4.29 (A), com este protótipo foi corrigido os furos para fixação, como também sobreposições com a estrutura de suporte das caixas, garantindo assim a perfeita fixação da *PCB* às mesmas. Tendo sido ainda redimensionada a área da placa em todo o perímetro, no intuito da eventualidade do nó sofrer um impacto, a *PCB* encontrar-

se mais afastada das paredes da caixa, aumentando assim a sua robustez (figura 4.29 (B)).

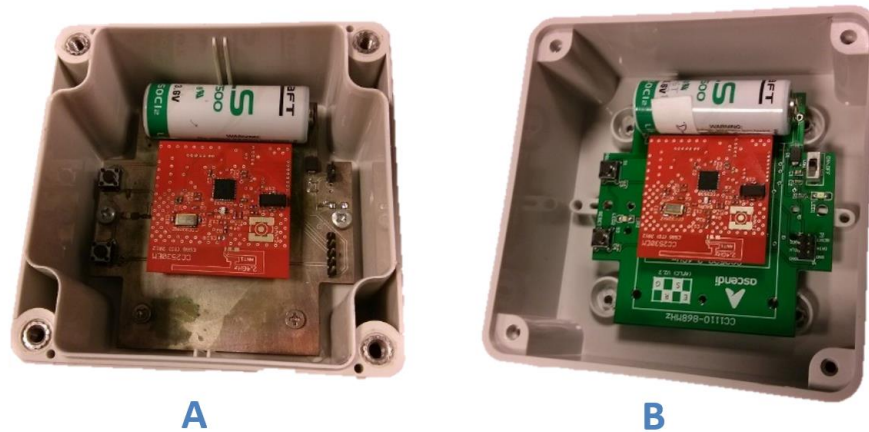


Figura 4.29-Nó *End Device* instalado na caixa de proteção

### 4.3.3 Access Point

No seguimento do desenvolvimento do nó ED, foi por sua vez criado o nó AP. A base da *PCB* é a mesma, uma vez que as dimensões e as caixas a utilizar são as mesmas. Os conetores foram mantidos, pois o AP também utiliza um módulo de comunicação igual ao dos módulos ED. O nó AP difere quanto à alimentação, sendo que este protótipo foi desenhado para ser alimentado pro *USB*, aproveitando o facto de estar ligado a um computador por *serial port*. Para fazer o interface entre *serial UART* e *USB* é utilizado um *chip FT232RL* da *FTDI™ Chip*. Para alimentar o módulo *CC2530EM*, houve a necessidade de reduzir a tensão da *USB* de 5 volts para 3,3 volts, para tal foi utilizada um regulador de tensão o *TPS7A4501*, produzido pela *Texas Instruments*. Sendo este a versão ajustável dos *TPS7Axxxx*, foi necessário calcular o valor de duas resistências para ajustar para a tensão desejada recorrendo à equação (1). Os valores das resistências escolhidas, dentro dos valores existentes para resistências de 1% foram para  $R1$  3,9K $\Omega$  e  $R2$  6,8K $\Omega$  (2).

$$V_{OUT} = V_{ADJ} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + (I_{ADJ})(R2) \quad (1)$$

$$V_{ADJ} = 1,21V$$

$$I_{ADJ} = 3\mu A$$

$$1,12 \left( 1 + \frac{6,8K}{3,9K} \right) + (3\mu)(6,8K) = 3,34V \quad (2)$$

No Apêndice E pode ser consultado o esquemático desta *PCB*, Onde estão representadas todas as ligações existentes entre os vários componentes anteriormente referidos nesta secção. Na Figura 4.30, está representado em (A) a *PCB* na vista 3D disponibilizada pela ferramenta *Altium* e em (B) o protótipo já fabricado.

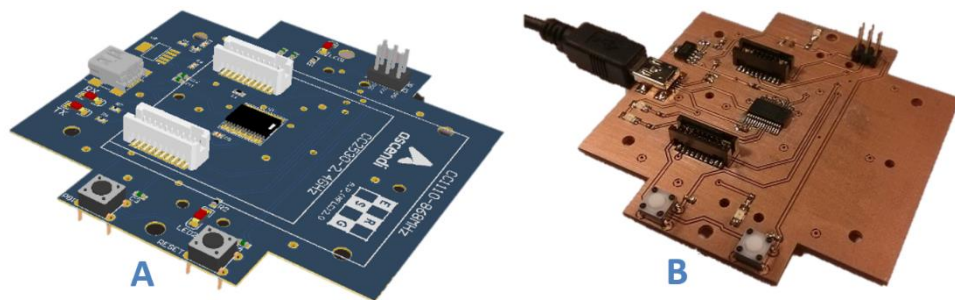


Figura 4.30-PCB desenvolvida para o *Access Point*

A aparência final do nó pode ser observada na imagem 4.31, estando já fixo à caixa de proteção *EC410C4* e com o módulo *CC2530EM* desenvolvido pelo grupo. Pode-se verificar a mesma aparência com o nó *End Device*, com as diferenças anteriormente referidas e foi necessário criar uma abertura para o cabo de ligação ao *PC desktop*.

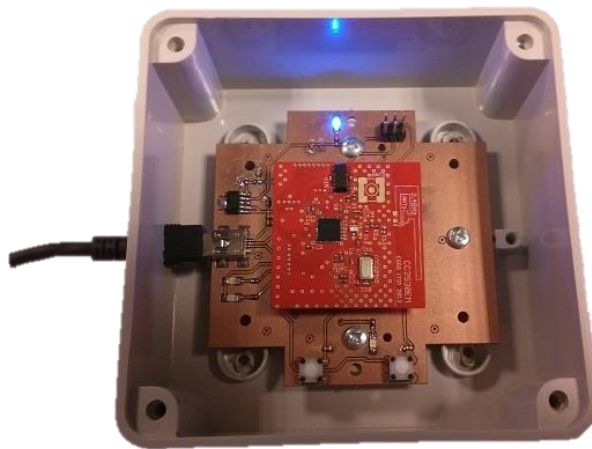


Figura 4.31- Nó *Access point*










### 4.3.4 CC1110 868MHz

Foi ainda desenvolvido uma *PCB*, com a finalidade de utilizar como módulo de comunicação o *SoC CC1110*, o qual comunica a frequência de 868MHz. Com o desenvolvimento deste módulo pretendia-se explorar uma nova gama de frequências menos saturada que a 2.4GHz, nomeadamente a gama sub 1GHz, onde se enquadra a frequência de comunicação do módulo *CC1110* (868MHz).

O primeiro passo no desenvolvimento deste módulo foi a seleção da antena. Após a análise das antenas apresentadas na tabela 4.6, foi selecionada a antena contornada a vermelho na tabela, denominada *Inverted F Antenna* (IFA).

Tabela 4-6- Antenas para comunicação na frequência 868MHz, (DesignNote035 TI)

(EB) SmartRF EB (SA) Stand Alone							
Design / Application Note	<a href="#">DN024 *1</a>	<a href="#">DN023</a>	<a href="#">DN031</a>	<a href="#">DN031</a>	<a href="#">DN033</a>	<a href="#">DN031</a>	<a href="#">DN038 *2</a>
Frequency	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz	868 / 915 / 920 MHz
Typical Efficiency	64%(EB) 98%(SA)	80%(SA)	69%(EB)	64%(EB)	48%(EB)	63%(EB)	66%(EB)
Bandwidth @ VSWR 2:0	88 MHz (SA)	40 MHz	62 MHz	56 MHz	56 MHz	6 MHz	40 MHz
Dimensions (mm)	38 x 25	43 x 20	10 x 28	48 x 8	15 x (5 to 29)	10 x 14	19 x 12

Esta antena tem a característica de ser desenhada no próprio cobre da *PCB*. Tendo como vantagem o baixo custo, pois apenas ocupa mais um pouco de área na *PCB* e é assim embutida de forma mais robusta na própria *PCB*. Na figura 4.32, podem ser consultados as dimensões a respeitar cuidadosamente no desenho da antena, de modo a garantir o bom funcionamento da mesma.

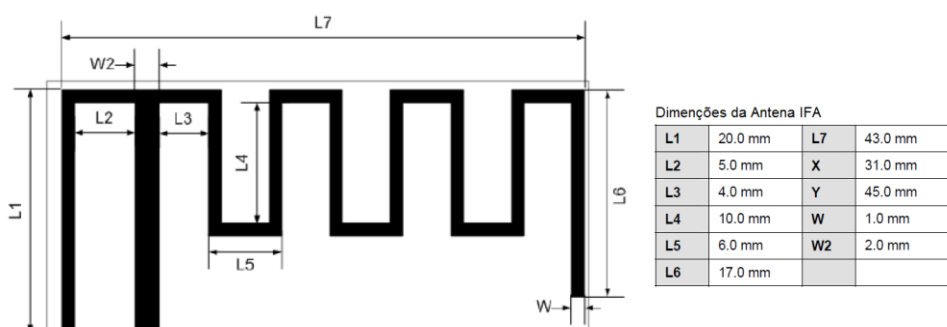


Figura 4.32-Antena IFA e as suas dimensões.



endereço *MAC* e guardar em memória, sendo que o AP envia de seguida uma mensagem a comunicar a sua ativação incluindo o seu endereço *MAC*. Depois disto, o AP esta pronto a iniciar comunicação, criando uma nova ligação, a qual fica a espera de resposta por parte de ED, como representado na seção (§4.2.1). Quando é estabelecido uma ligação a um ED, são recebidos os dados e seguidamente é preenchido a estrutura do protocolo definido (§4.2.2). É criado a trama a enviar pela porta série, seguindo-se o envio. Após isto, é fechada a ligação e criada uma nova a espera da comunicação de outro ED. Sendo que na ocorrência de uma colisão, em questão de segundos este processo é repetido várias vezes.

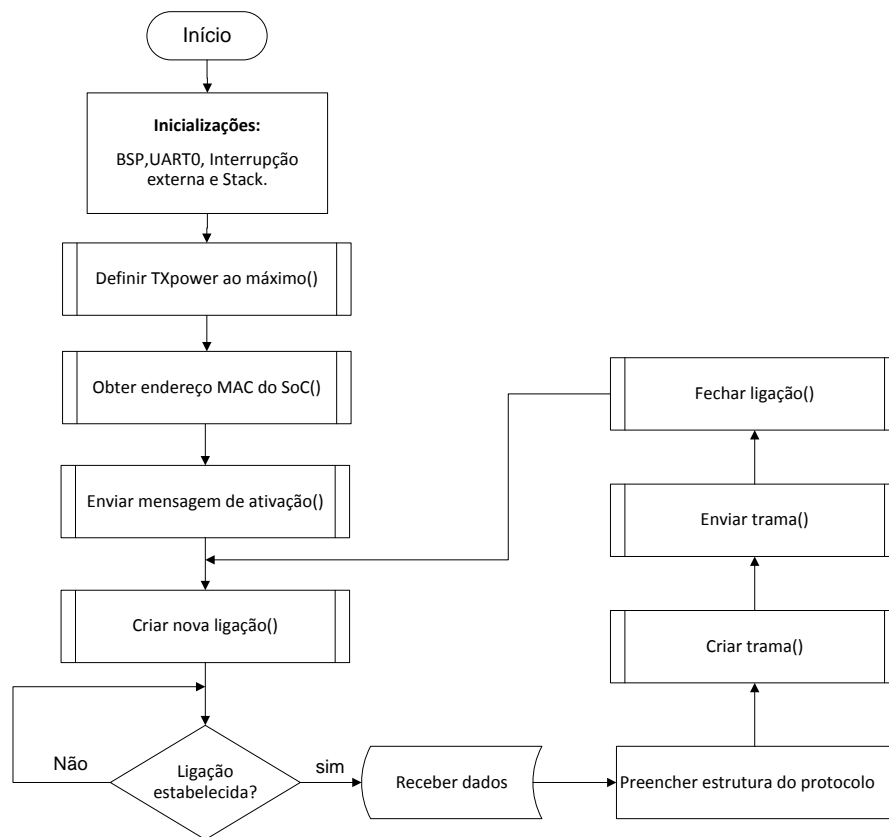


Figura 4.34-Diagrama de funcionamento do AP

Um ponto-chave no processamento por parte do AP é a criação da trama a enviar por porta série para o Desktop. Sendo que existem três tipos de mensagem, como anteriormente descrito em (§4.2.2). A diferenciação das mensagens a serem enviadas é feita através de uma *flag* numérica, a qual é verificada no momento de criar a trama de envio. Essa trama é enviada em forma de *Spring*. No diagrama da figura 4.35 está

representado o funcionamento da função responsável por devolver a mensagem a enviar.

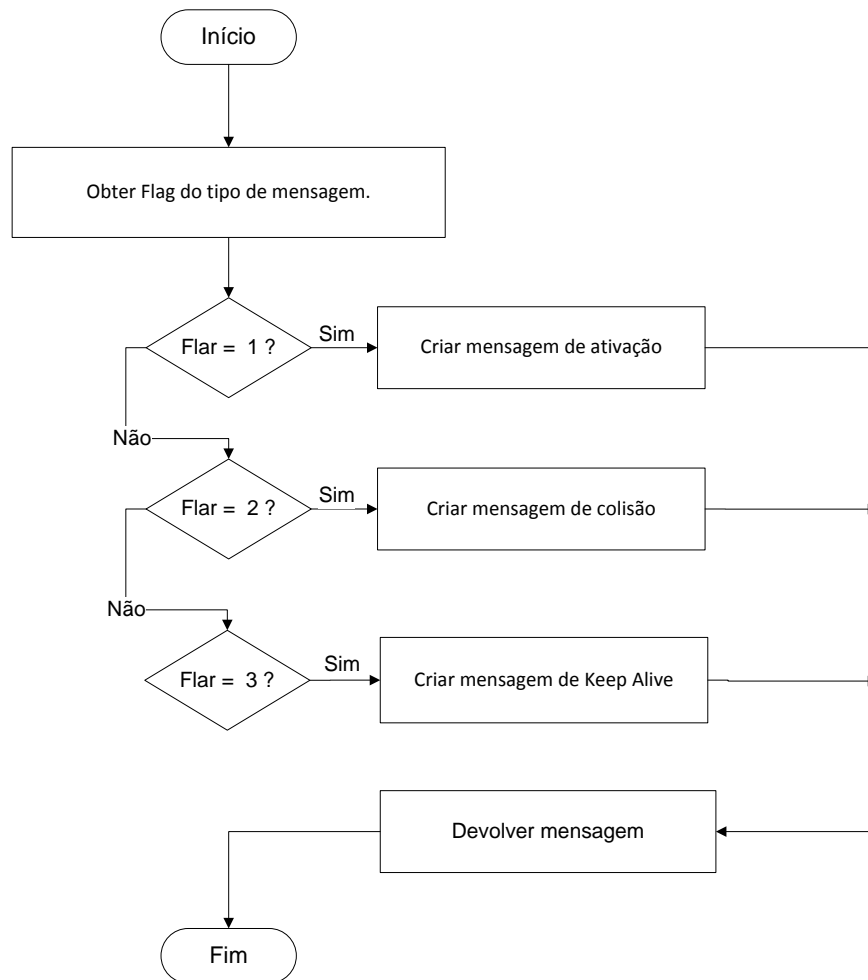


Figura 4.35-Diagrama da função de criação de mensagem a enviar por porta série (UART)

#### 4.4.2 Software que implementa os nós *End device* da rede

Por sua vez o ED tem como funções a deteção de acelerações na guarda de segurança e o envio periódico de *Keep Alives*. Para baixo consumo de energia, o SoC foi colocado em *Power mode 2* (PM2) (§3.5.1), o qual conta com um *Timer* para controlar o tempo entre acordades do SoC. Este tempo é utilizado para implementar os *Keep Alive*, tendo sido definido um tempo de 2 horas. Para despertar o SoC em caso de colisão foi implementado uma interrupção externa no mesmo, provocada pelo acelerómetro, quando a aceleração é superior a um valor de *threshold* programável. No diagrama da figura 4.36 é possível consultar o funcionamento do nó ED, que após

ser ligado, faz as inicializações dos periféricos e da *Stack*, incluindo a configuração do acelerómetro, o qual comunica por *SPI*. De igual modo que para o AP é feita a ativação da potência máxima de transmissão, como a obtenção do endereço *MAC* e do seu envio. Sendo que neste caso é enviado para o AP, o qual redireciona a mensagem de ativação do ED para o Desktop. De seguida é configurado e ativado o timer utilizado pelo *PM2*. No momento que o timer atinge o valor estipulado é enviado a mensagem de *Keep Alive*.

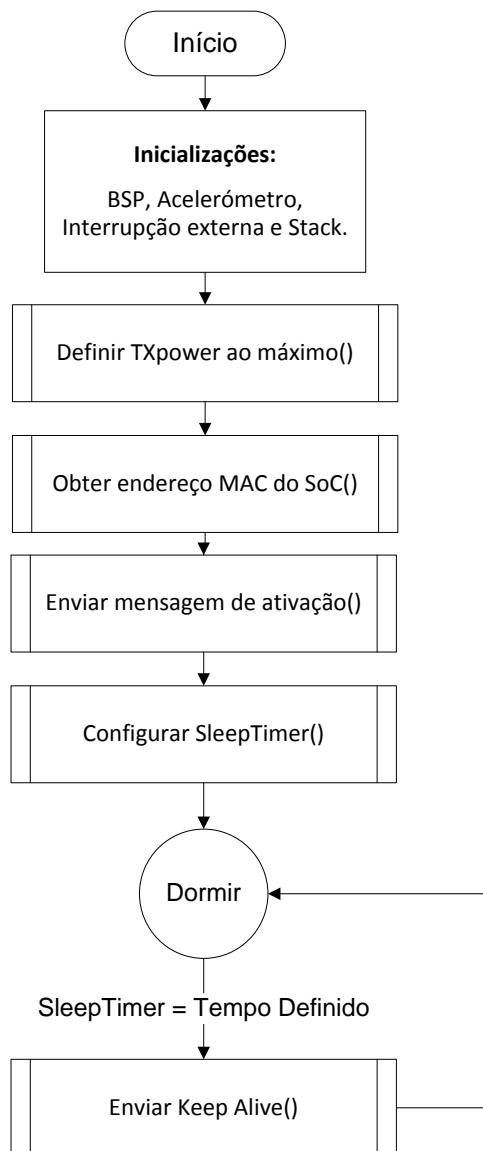


Figura 4.36-Diagrama de funcionamento do ED

A interrupção externa sucede na ocorrência de um degrado de tensão no pino zero do porto zero (P0.0). Este degrau é criado pelo acelerómetro na ocorrência de uma aceleração superior ao *threshold*. O diagrama da figura 4.37 demonstra o funcionamento da interrupção externa no SoC.

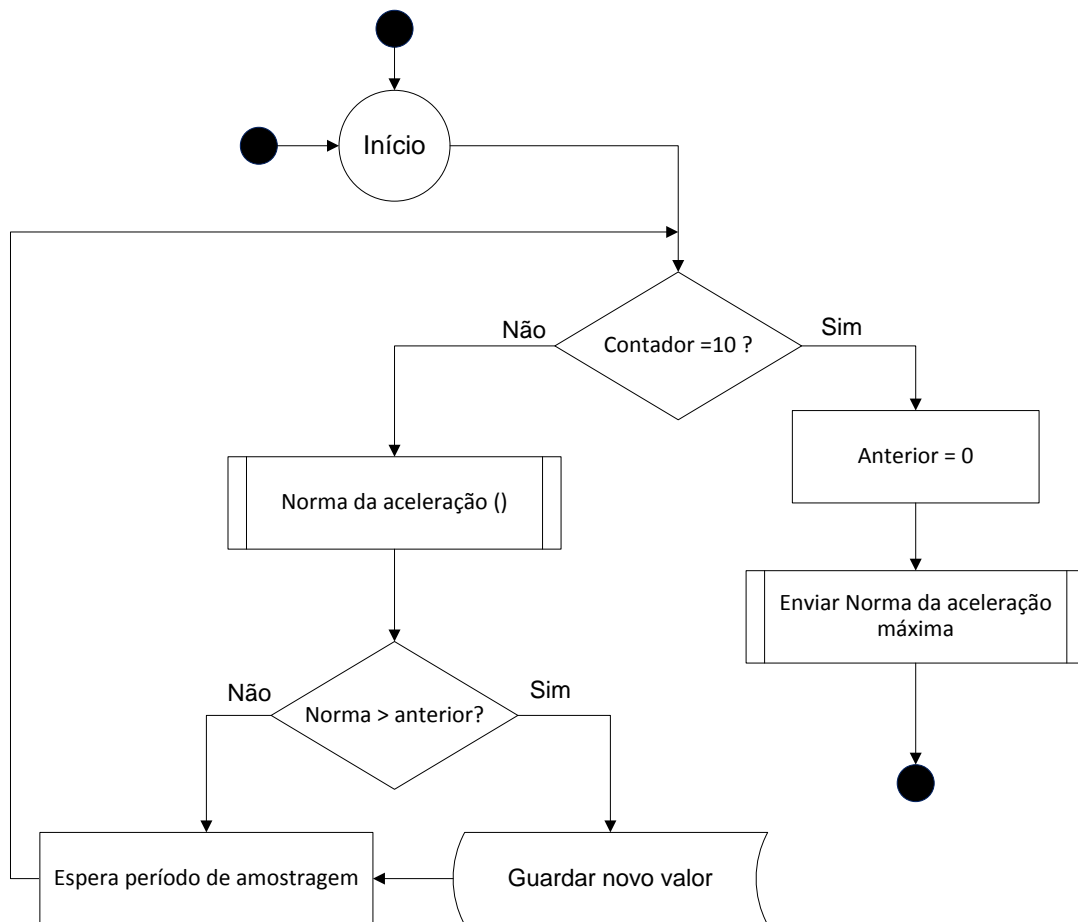


Figura 4.37-Diagrama de funcionamento da rotina de serviço à interrupção

As ondas de choque são harmónicas sinusoidais, tendo sido comprovado nas simulações (§4.1). Sabendo desta característica e com o objetivo de obter o valor de amplitude máximo da aceleração, quando chamada a rotina de serviço a interrupção (figura 4.41), esta tem como função obter a norma do vetor de máxima amplitude. Para tal é feito o cálculo através da fórmula (1), obtendo a norma com os valores lidos dos três eixos cartesianos (X,Y e Z), como demonstra o diagrama da figura 4.38.

$$\text{Norma da aceleração} = \sqrt{|X^2 + Y^2 + Z^2|} \quad (1)$$

A amostragem é feita com um período de 2 milissegundos, sendo que baseado nas simulações o período a utilizar é 1,7 milissegundos, foi assim utilizado o valor mais próximo possível. São feitas 10 amostras, na qual é calculado a norma e comparada com a anterior. Quando é superior ao valor da amostra anterior, é guardado esse mesmo valor. Obtendo assim no fim o valor mais alto, correspondendo ao pico de aceleração.

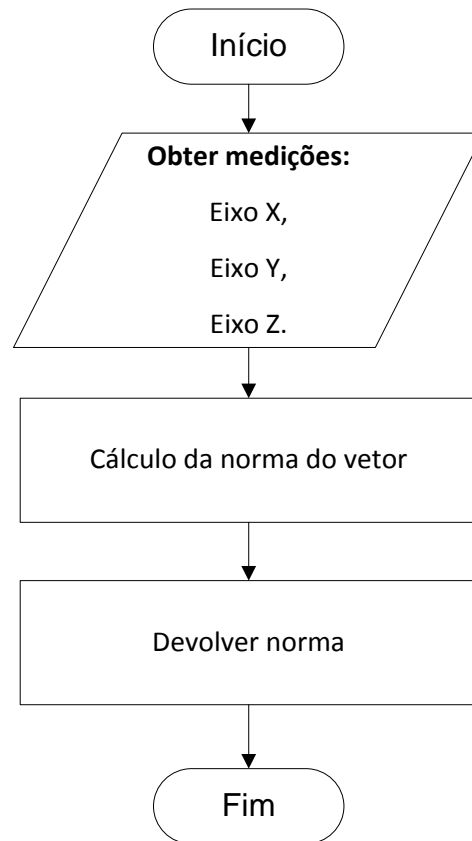


Figura 4.38-Diagrama do cálculo da Norma da aceleração

#### 4.4.3 Software desenvolvido para Desktop

Foi desenvolvido uma aplicação em C#, para receber os dados do AP, o que permite a interação com um utilizador. Sendo também possível a interação com um website e aplicação *smartphone* ambos desenvolvidos pelo grupo para dar suporte ao projeto.

A aplicação ao nível da interface, como é possível visualizar na figura 4.39, possibilita ao Operador a visualização das colisões, *Keep Alive* e dos erros ocorridos com as WSNs tudo na mesma janela.

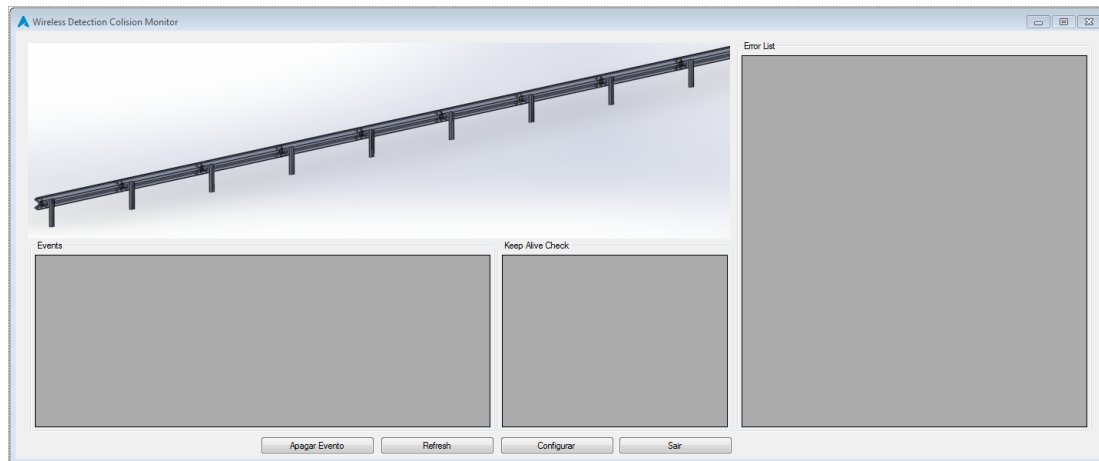


Figura 4.39-Janela principal da aplicação Desktop

Exibe ainda, uma representação da posição da colisão em relação aos dois nós (ED) que relataram maior aceleração. Sendo que é feito um cálculo que relaciona a aceleração obtida nos nós com a distância entre os mesmos. Apontando assim uma posição aproximada do local onde ocorreu a colisão. A fórmula desenvolvida para o cálculo do local de colisão pode ser consultada na equação (2). A qual tem como objetivo calcular em que quilometro da autoestrada ocorreu a colisão. Para tal é calculado a distância em relação ao ED instalado mais próximo da origem da autoestrada, sendo somada a distância relativa da colisão à posição do mesmo. Para possibilitar o cálculo, é necessário primeiro determinar o espaçamento entre os nós (1), recorrendo ao quilómetro onde estão instalados os EDs.

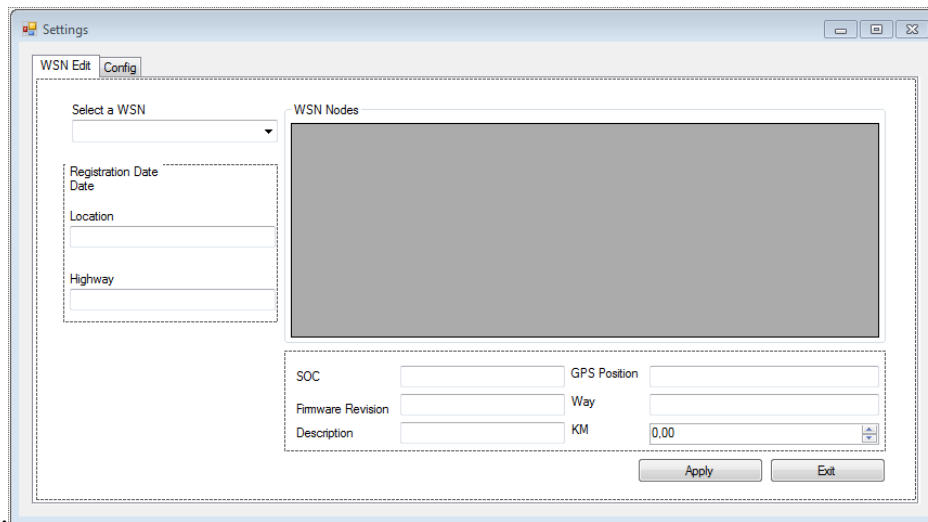
$$D = d_{KM_{maior}} - d_{KM_{menor}} \quad (1)$$

$$d_{colisão} = \frac{D}{\left(\frac{ACC_{KM_{menor}}}{ACC_{KM_{maior}}}\right)^{+1}} + d_{KM_{menor}} \quad (2)$$

No acontecimento de ser ligado um AP, sendo que o mesmo comunica a sua ativação. A aplicação vai automaticamente criar uma WSN nova, estando o instalador encarregue de preencher os dados sobre a mesma e sobre o AP em questão. Na figura

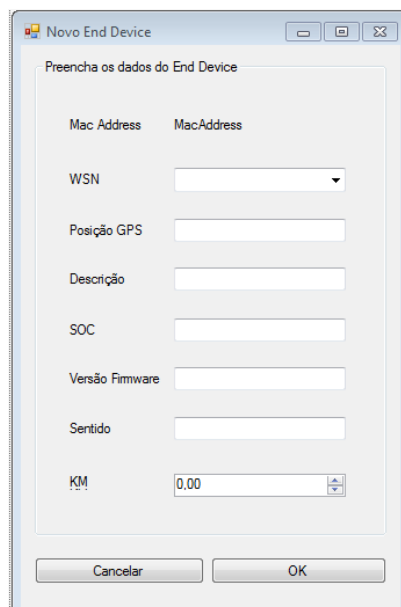


4.40, pode ser visualizado a janela de interface para registo e alteração dos campos que caracterizam as WSNs e os seus nós associados.



**Figura 4.40-Janela para registo e alteração de uma WSN e respetivos nós**

Após ativação de um nó ED, é apresentado de forma automática a janela ilustrada na imagem 4.41. possibilitando o preenchimento de todos os campos que caracterizam um ED.



**Figura 4.41-Janela para inserção dos dados sobre ED descoberto**

Quanto ao processamento em *background*, este tem como tarefas a gestão das comunicações com o AP e manter a base de dados e GUI atualizados. Este processamento pode ser dividido em duas partes, uma que é processada continuamente e outras que ocorre com um período de tempo definido.

O diagrama da figura 4.42 descreve a *thread* implementada para a receção e tratamento dos dados da porta série. Após receber uma mensagem nova, é feita a interpretação dessa mensagem e é realizado a verificação do endereço *MAC*. Se se tratar de um dispositivo novo é verificado se é ED ou AP. No caso de AP é criado uma WSN nova, no caso de ED, é lançada a janela para preenchimento dos campos associados (figura 4.42). Sendo um *MAC* conhecido é processado o conteúdo da mensagem, guardando os dados com a respetiva hora.

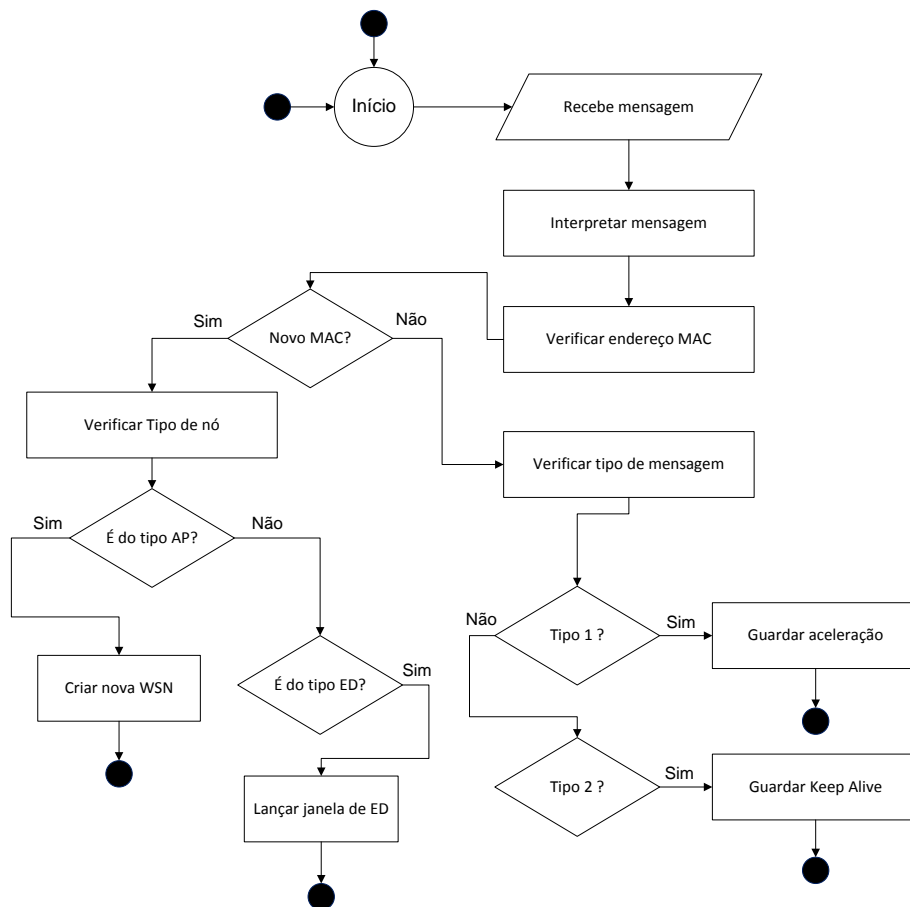


Figura 4.42-Diagrama de funcionamento da *thread* criada

Nesta aplicação é necessário a execução de tarefas em períodos de tempo, sendo elas o processamento dos dados de uma colisão, e a verificação dos *Keep Alive*.

No diagrama da figura 4.43 é possível visualizar a representação dos dois temporizadores anteriormente descritos. Sendo que no caso do temporizador de colisões, este destina-se a definir um intervalo de tempo de 5 segundos. O qual permite a receção de todos os nós envolvidos na colisão. Após este intervalo as acelerações recebidas são listadas numa tabela ordenada por ordem decrescente, com a finalidade de serem escolhidos os dois nós de maior aceleração, pois a colisão terá acontecido entre eles. Seguindo-se o cálculo do local da colisão como anteriormente referido. Após este cálculo é emitido o alerta para o operador, criando uma representação na GUI.

Quanto à gestão dos *keep Alive*, o temporizador tem de ter duração igual ou superior ao período definido nos nós para dar tempo destes responderem. Tendo sido definido um período de 2 horas, o temporizador está definido para 2 horas e 15 minutos. Executando duas verificações aos nós listados na base de dados;

- Verifica se os nós desativados voltaram a responder, notificando o operador.
- Verifica os nós ativos, garantindo que todos eles responderam desde a última verificação. Notificando o operador dos nós em falha.

Para possibilitar estas verificações, são comparadas as horas de chegada do último *Keep Alive* de cada nó com a hora atual no momento da verificação.

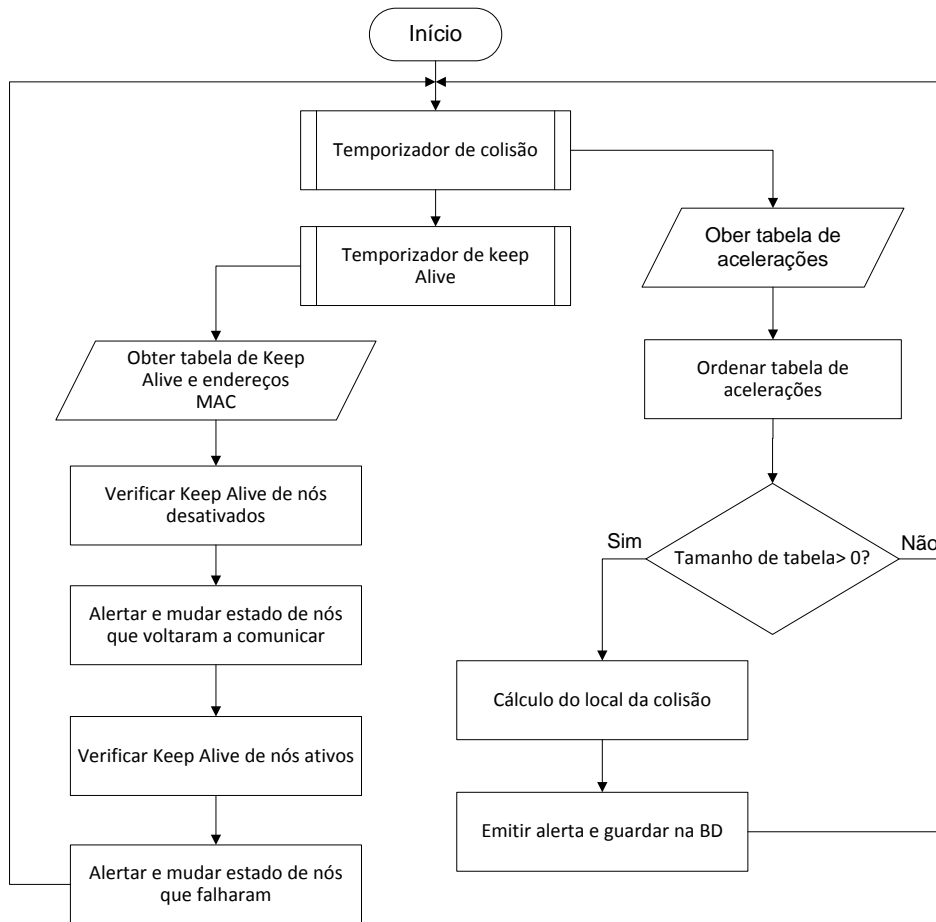


Figura 4.43-Diagrama de funcionamento do temporizador

#### 4.4.4 Website, base de dados e Aplicação Smartphone

Para complementar a aplicação para desktop, o grupo desenvolveu em paralelo um website e uma aplicação para *Smartphone*, os quais partilham a mesma base de dados da aplicação para *PC Desktop*. Na figura 4.44 está representado o modelo de entidades e relacionamentos da base de dados criada para testar o sistema. De forma a realizar a interface entre a base de dados e as aplicações, foi implementado em *JAVA*, um conjunto de serviços Web utilizando o protocolo *REST*. Os serviços *web*, a base de dados e o *website*, foram colocados num servidor *Web* instalado numa máquina alojada na nuvem (Cloud) da *Amazon*.

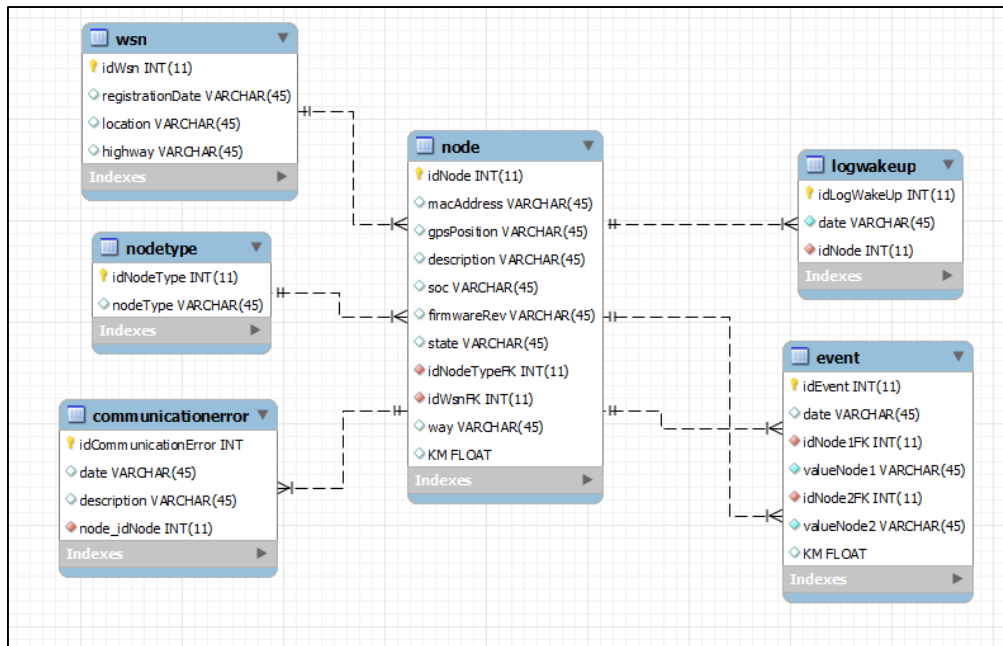


Figura 4.44-Representação do modelo de entidades e relacionamento da base de dados

O *website* permite a gestão do sistema através da visualização dos componentes da rede e das colisões ocorridas. Esta ferramenta foi desenvolvida com apoio da *framework ExtJS*, com recurso às linguagens *Javascript*, *HTML5* e *CSS3*. No capítulo seguinte será apresentado e explicado o *website* num caso de teste real, juntamente com todos os outros componentes do sistema.

A aplicação desenvolvida para *Smartphone* foi criada para a plataformas *Android* (figura 4.45), sendo compatível com praticamente todos os dispositivos que utilizem este sistema operativo. Esta aplicação móvel disponibiliza a mesma informação que o *Website* e aplicação *Desktop* fornecem ao utilizador como anteriormente descrito.

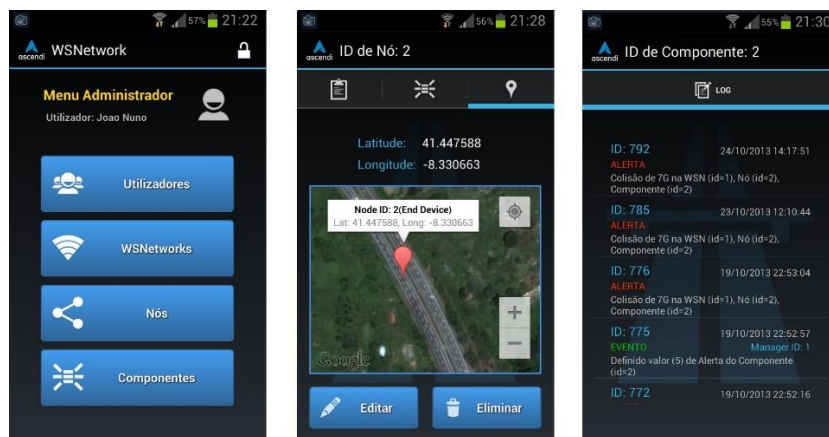


Figura 4.45- Aplicação para Smartphone

## 4.5 Resumo

Neste capítulo foi realizado a descrição de todos os componentes que formam o sistema de deteção de colisões. Estando esta primeira versão completa, é possível montar e testar o sistema.

## 5. Avaliação do Sistema

Neste capítulo é feito uma análise ao sistema proposto, a qual passa por analisar o desempenho do mesmo, verificando a fiabilidade e o tempo de resposta. Sendo ele instalado e testado nas instalações disponibilizadas. Por sua vez, é levado em consideração o consumo como uma variável importante na autonomia e manutenção do sistema. Para verificar a viabilidade do sistema é apresentado uma análise do custo do mesmo.

### 5.1 Análise de desempenho

A este ponto, com o *hardware* e *software* desenvolvido até ao momento é possível implementar o sistema para o testar. No qual é possível testar as comunicações, o algoritmo de deteção de colisão e o funcionamento de todas as componentes do sistema. Estas componentes apresentadas no capítulo anterior (§4), estão representadas na figura 5.1.

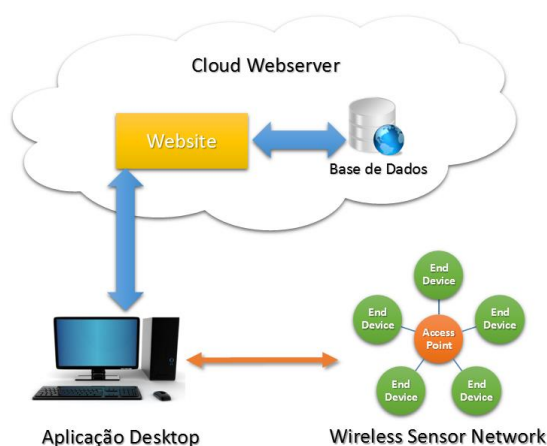
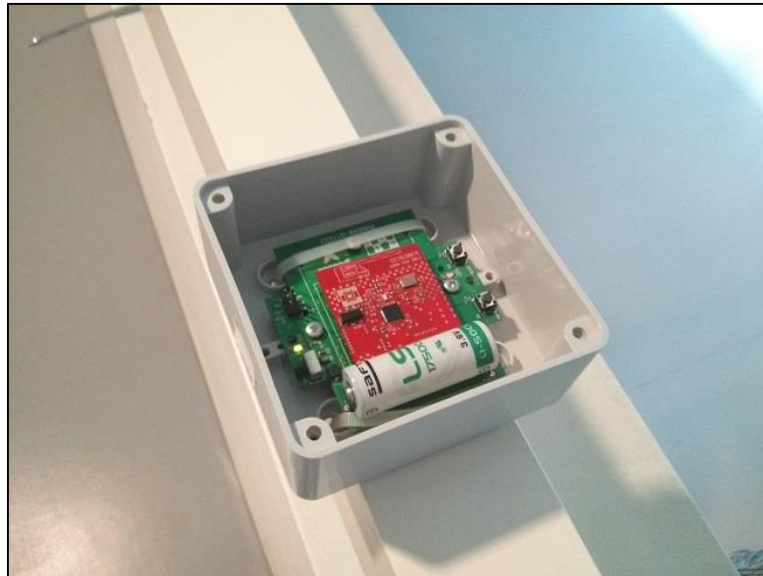


Figura 5.1- Representação do sistema testado

O local facultado para a realização dos testes ao sistema foi no interior de um prédio pertencente a universidade, onde existe uma viga metálica de dez metros de comprimento. Realizou-se a instalação dos EDs como se pode visualizar na figura 5.2. estando o nó pousado na viga e fixado com abraçadeiras plásticas e adesivo de dupla face. Garantindo uma perfeita fixação à viga.



**Figura 5.2- Nó End Device fixado na estrutura de teste**

Foram instalados três EDs na viga em questão, estando posicionados como demonstra a figura 5.3, onde é possível observar de vários pontos de vista. O nó AP está colocado distante da viga.



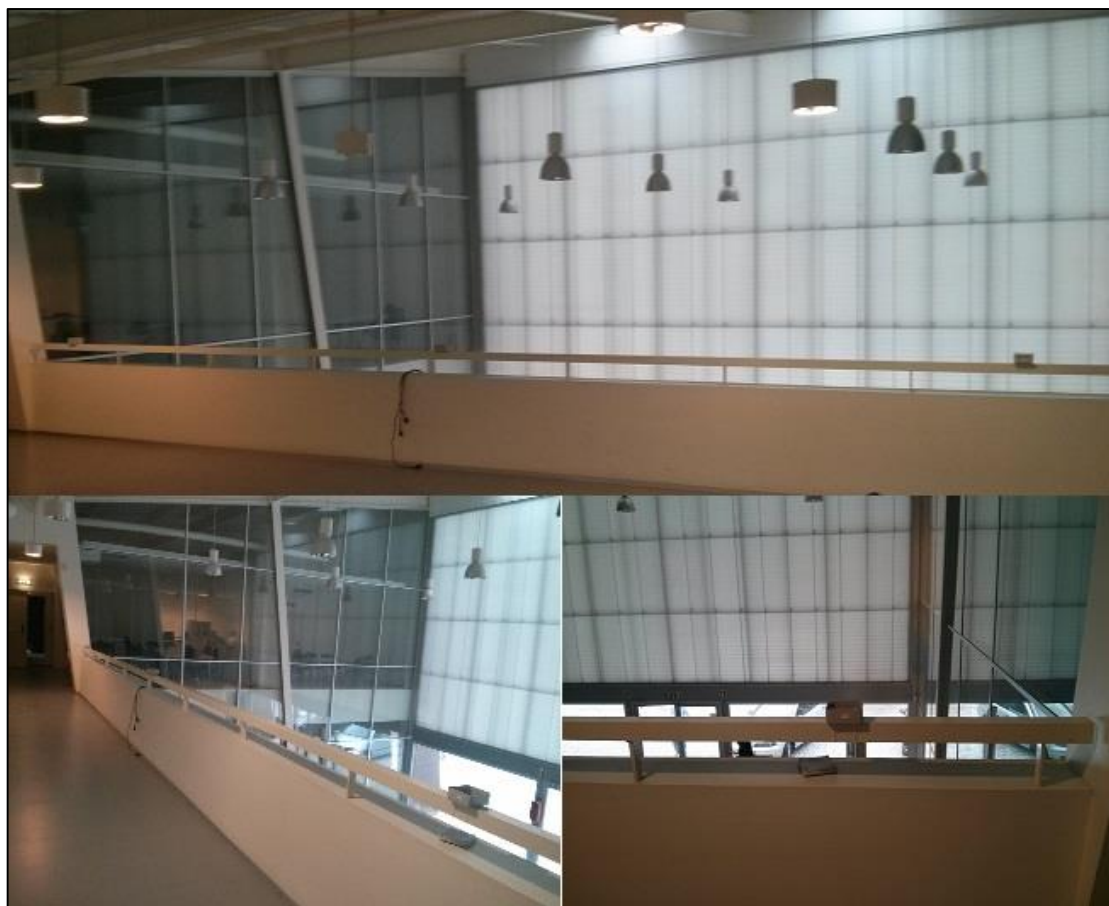


Figura 5.3-Vários pontos de vista da instalação dos EDs na estrutura de teste

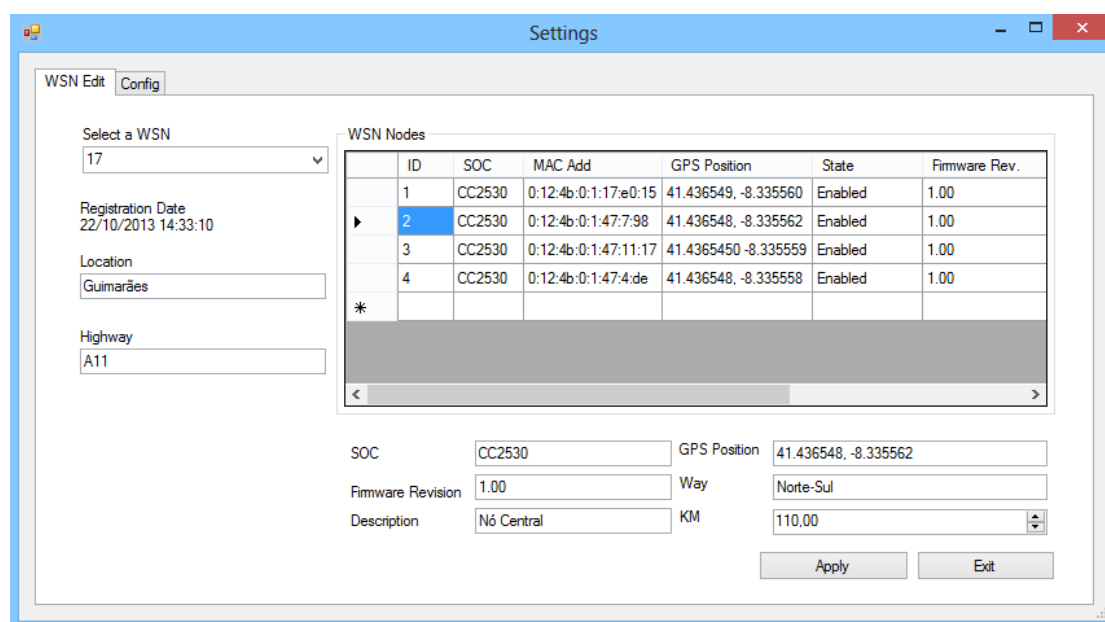
O sistema teve de sofrer uma calibração quanto às configurações do acelerómetro, devido a estrutura utilizada e à gama de acelerações que estará sujeito. Pois neste caso as colisões na viga serão feitas com a ajuda de um martelo. Na tabela 5.1 é feito a comparação das configurações aplicadas para este teste prático e os valores previstos para utilização nas guardas de segurança baseados nas simulações. Os parâmetros que variam são; a gama dinâmica, o *threshold* de geração de interrupção e o eixo o qual é comparado ao valor de *threshold*. Este último parâmetro depende da posição do nó na estrutura, sendo que nas guardas de segurança a posição mais vantajosa é atrás das guardas, estando a *PCB* perpendicular ao solo. Neste caso a *PCB* está paralela ao solo, mudando assim a disposição dos eixos.

Tabela 5-1-Calibração do acelerómetro para o teste prático

Parâmetro	Teste Prático	Aplicação em guardas de segurança
-----------	---------------	-----------------------------------

<b>Gama dinâmica de aceleração</b>	$\pm 2g$	$\pm 100g$
<b>Valor de <i>Threshold</i></b>	0,031g	4g
<b>Eixo que gera a interrupção.</b>	Eixo Y	Eixo X

Após a calibração dos acelerómetros, foi criada a rede de teste. Sendo ela criada como descrito em (§4.4.3). Após ser ligado o AP é automaticamente criada a WSN, de seguida são associados os três EDs ao serem ativados na viga. Na figura 5.4 é possível visualizar a janela da aplicação, onde podem ser consultados e alterados as informações dos nós que compõem a WSN.



**Figura 5.4-Janela da aplicação Desktop com a descrição dos nós que compõem a WSN**

Na janela principal da aplicação podem ser monitorizadas todas as atividades do sistema, sendo: colisões, *Keep Alive* e erros da WSN. Na figura 5.5 pode ser visualizado os respetivos campos, os quais são atualizados automaticamente. Foram feitos uma série de embates na viga para criar eventos, estes eventos foram todos registados pelo sistema. Em alguns ensaios obteve-se resposta por parte apenas de um ED, devido a algumas batidas de menor intensidade, ou batidas feitas mesmo sobre a posição de um dos nós. É importante realçar que a viga em questão apenas vibra com as pancadas. Mesmo assim o sistema não deixa passar nenhuma colisão sem ser

reportada. Sendo apresentando os dados dessas colisões juntamente com a representação gráfica.

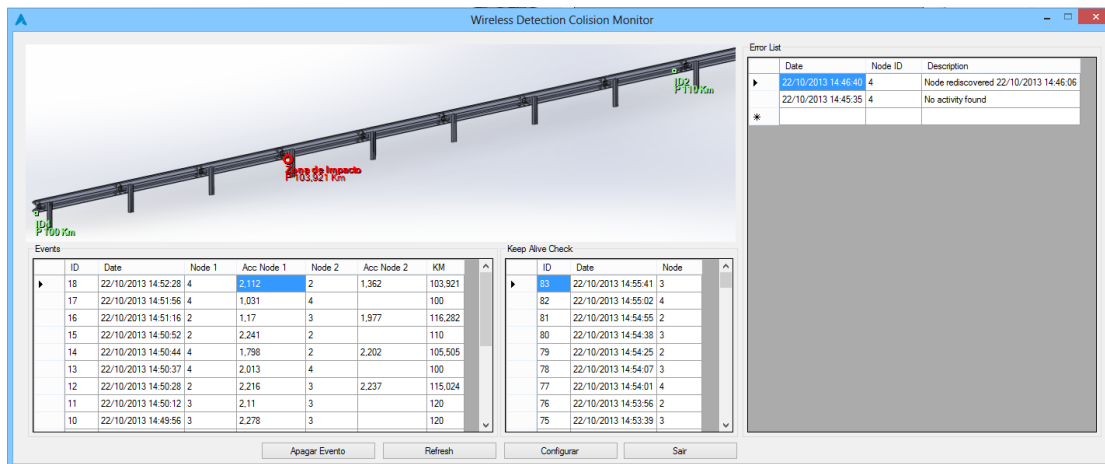


Figura 5.5-Janela principal da aplicação Desktop após efetuados alguns testes

Em paralelo é atualizado o *Website*, onde é possível visualizar todas as informações do sistema de forma remota. Na imagem 5.6 é possível de igual forma como na aplicação (figura 5.4) observar a composição da WSN.

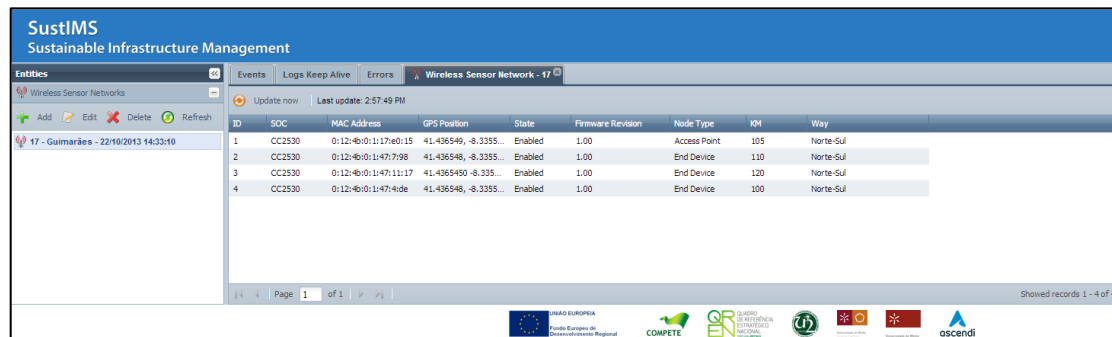


Figura 5.6-Apresentação da WSN de teste no Website

Noutro separador (figura 5.6) é possível consultar as colisões que ocorreram nesta WSN, estando todos os parâmetros listados, incluindo os dois nós de maior aceleração envolvidos e suas respetivas acelerações.

SustIMS  
Sustainable Infrastructure Management

Entities Wireless Sensor Networks

17 - Guimarães - 22/10/2013 14:33:10

Events Logs Keep Alive Errors Wireless Sensor Network - 17

Update now Last update: 2:58:30 PM

ID	Date	Node 1	Acceleration 1	Node 2	Acceleration 2
1	22/10/2013 14:43:05	2	2,365	2	
2	22/10/2013 14:47:00	3	1,977	3	2,281
3	22/10/2013 14:47:24	2	2,507	2	2,535
4	22/10/2013 14:47:48	3	2,795	3	
5	22/10/2013 14:48:20	3	2,417	3	2,119
6	22/10/2013 14:48:37	2	1,884	2	2,307
7	22/10/2013 14:48:45	4	2,107	4	
8	22/10/2013 14:48:53	3	2,072	3	
9	22/10/2013 14:49:08	2	1,126	2	
10	22/10/2013 14:49:56	3	2,278	3	
11	22/10/2013 14:50:12	3	2,11	3	
12	22/10/2013 14:50:28	2	2,216	2	2,237
13	22/10/2013 14:50:37	4	2,013	4	
14	22/10/2013 14:50:44	4	1,798	4	2,202
15	22/10/2013 14:50:52	2	2,241	2	
16	22/10/2013 14:51:16	2	1,17	2	1,977
17	22/10/2013 14:51:56	4	1,031	4	
18	22/10/2013 14:52:28	4	2,112	4	1,362

Page 1 of 1

Figura 5.7-Apresentação das colisões no Website

Num segundo separador do Website é apresentado todos os Keep Alive. Podendo ser visualizados o momento em que os nós são ativados e iniciam o envio periódico de Keep Alives. Sendo que após estarem todos ativos o envio é feito escalado entre os nós.

SustIMS  
Sustainable Infrastructure Management

Entities Wireless Sensor Networks

17 - Guimarães - 22/10/2013 14:33:10

Events Logs Keep Alive Errors Wireless Sensor Network - 17

Update now Last update: 2:58:45 PM

ID	Date	Node
1	22/10/2013 14:42:34	2
2	22/10/2013 14:42:35	2
3	22/10/2013 14:42:59	2
4	22/10/2013 14:43:01	2
5	22/10/2013 14:43:59	3
6	22/10/2013 14:43:59	2
7	22/10/2013 14:44:00	3
8	22/10/2013 14:44:01	2
9	22/10/2013 14:45:18	3
10	22/10/2013 14:45:19	2
11	22/10/2013 14:45:20	3
12	22/10/2013 14:46:28	2
13	22/10/2013 14:46:06	4
14	22/10/2013 14:46:08	3
15	22/10/2013 14:46:26	2
16	22/10/2013 14:46:38	3
17	22/10/2013 14:46:57	3
18	22/10/2013 14:47:08	2
19	22/10/2013 14:47:06	4
20	22/10/2013 14:47:08	3
21	22/10/2013 14:47:20	2
22	22/10/2013 14:47:23	4
23	22/10/2013 14:47:37	3
24	22/10/2013 14:47:45	2
25	22/10/2013 14:47:47	3
26	22/10/2013 14:47:56	2
27	22/10/2013 14:48:07	3
28	22/10/2013 14:48:15	2
29	22/10/2013 14:48:16	3
30	22/10/2013 14:48:26	2
31	22/10/2013 14:48:37	2
32	22/10/2013 14:48:39	3
33	22/10/2013 14:48:39	4
34	22/10/2013 14:48:53	2

Page 1 of 4

Showing records 1 - 25 of 96

Figura 5.8-Apresentação dos Keep Alive no Website

Num terceiro e último separador (5.9) é feito a listagem dos erros ocorridos nas WSNs, onde é notificado os nós que não respondem e os que voltaram a responder.

Foi ainda feito um teste ao sistema de gestão de *Keep Alive*, tendo sido desligado um ED propositadamente, o qual foi detetado pelo sistema. Após a notificação do sistema foi de novo ligado o ED. Na verificação seguinte o sistema reconheceu o nó que anteriormente tinha falhado, e notificou o utilizador tanto na aplicação como no *Website* que esse nó voltou a estar ativo e funcional.

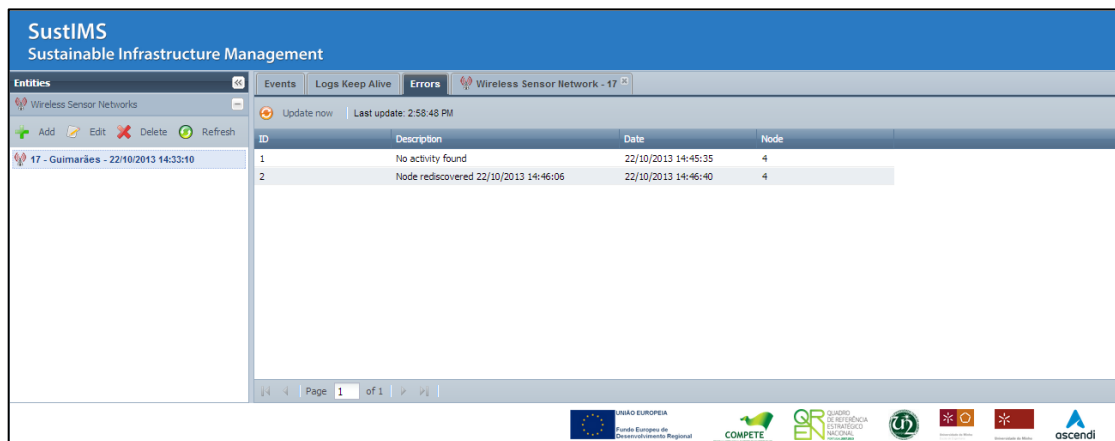


Figura 5.9-Apresentação dos erros das WSNs

## 5.2 Análise de consumo

Os nós fixados na guarda de segurança (ED) são alimentados através de uma bateria *Saft LS17500* (§3.5.3). Para maximizar a duração dessa bateria é necessário minimizar o consumo energético. Para tal é utilizado um dos modos de "poupança de energia" do *SoC* (o *Power Mode 2*), o qual permite a utilização de um temporizador para controlar o tempo que decorre em modo *Sleep*. Na tabela 5.2 estão listados os vários estados de funcionamento do *SoC* e do acelerómetro com os respetivos consumos especificados pelos fabricantes.

Tabela 5-2- Consumo energéticos teórico especificado pelos fabricantes

Modo de funcionamento	Consumo energético teórico
<i>SoC CC2530 a transmitir (TX)</i>	29mA

<i>SoC CC2530 a receber (RX)</i>	24mA
<i>SoC CC2530 PM2 em sleep</i>	1 $\mu$ A
<i>LIS331DLH normal mode</i>	250 $\mu$ A
<i>LIS331DLH Low-power mode</i>	10 $\mu$ A

Os consumos reais obtidos para o nó ED estão representados na tabela 5.3, as medições foram feitas com base num multímetro colocado (em série com a bateria).

**Tabela 5-3-Consumos energéticos medidos para o nó ED**

<b>Modo de funcionamento</b>	<b>Consumo energético medido</b>
<i>Modo Sleep</i>	320 $\mu$ A
<i>Modo Ativo</i>	31,33mA

Com a ajuda de um osciloscópio digital *MSO4104* da *Tektronix*, foram feitas as medições dos tempos de comunicação dos *Keep Alives* e do envio da aceleração quando ocorre uma colisão. Foi também realizado um teste ao tempo decorrido entre tramas de *Keep Alives*. Para facilitar essa verificação, foi definido o período entre *keep Alives* de 30 segundos. Na Figura 5.10, pode ser observado o resultado do teste efetuado (Os sinais de *Keep Alives* representados na figura estão marcados com por uma bola azul). Foi aplicada uma aceleração ao ED para testar o comportamento, através da ativação da interrupção externa. Como se pode verificar na Figura 5.10 o período manteve-se, mesmo com a deteção de uma colisão e envio do valor da aceleração para o AP (representado pelo sinal com distintivo de bola vermelha).

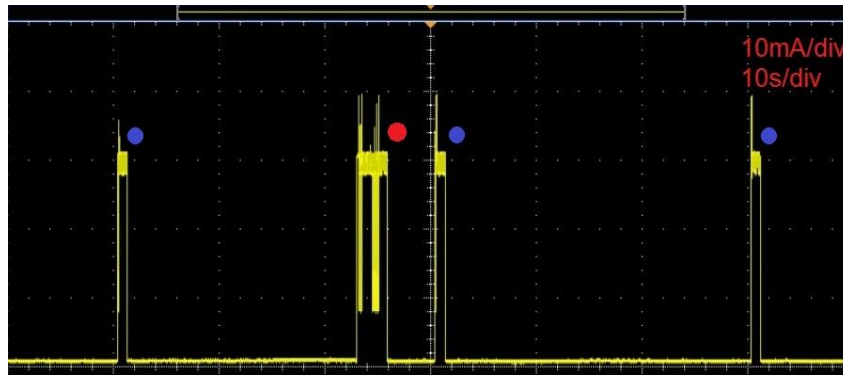


Figura 5.10- Teste ao tempo decorrido entre *Keep Alives*

Diminuindo a escala temporal é possível com precisão identificar o tempo que o ED está ativo, para executar as tarefas de detecção de colisão e envio periódico das tramas de *Keep Alive*, representadas na Figura 5.11 em A e B, respectivamente. A tarefa de detecção de colisão tem uma duração de 3,2 segundos, incluindo a ligação ao AP, e o envio dados. Na figura A é possível observar os momentos de comunicação, devido aos picos de corrente. Por sua vez, a comunicação das tramas de *Keep Alive* tem duração de 1,2 segundos. Sendo que estes tempos podem variar devido a colisões na rede e outros problemas de comunicação.

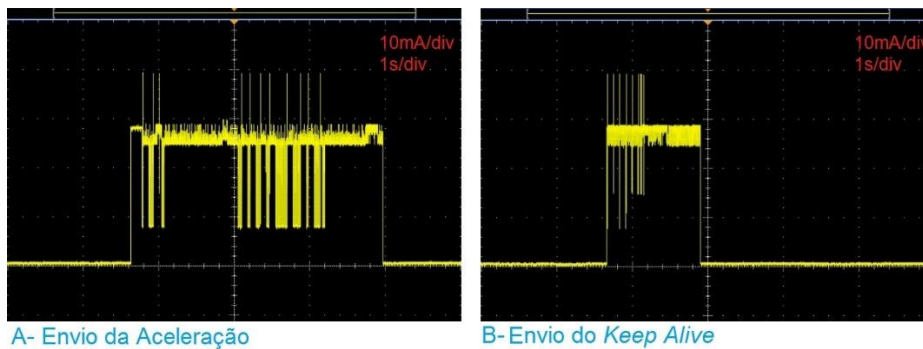


Figura 5.11-Tempo de envio por parte do ED

O cálculo da autonomia, pode ser efetuado, sendo que todos os parâmetros são conhecidos. Na aplicação nas guardas de segurança, o intervalo de tempo entre tramas de *Keep Alive* é de 2 horas. Significando que o sistema está praticamente o tempo todo em modo *Sleep*. Mais concretamente o ED está em 99,94% do tempo em modo *Sleep* (não ocorrendo colisões) e apenas 0,06% ativo no envio das mensagens periódicas. Sendo o consumo do nó ED de 1,15mWh e a energia disponível da bateria

de 12,96Wh calculado com base no *datasheet* da mesma. Para ser mais realista, o cálculo (1) foi feito contando com perdas de 10%, devido a descarga ao longo do tempo da bateria, sendo também influenciada pelas temperaturas que estará sujeita na sua vida útil.

$$Autonomia = \frac{E_{bateria}}{E_{ED}} * \eta \quad (1)$$

$$Autonomia = \frac{12,96Wh}{1,152mWh} * 0,90 = 10125horas \quad (2)$$

Como calculado em (2), a autonomia com rendimento de 90% tem um valor de 10125horas, o que equivale a 422 dias ou a pouco mais de 14meses de duração.

### 5.3 Custos do sistema

Levando em conta o custo do sistema desenvolvido, foi feito o levantamento do preço dos componentes utilizados na fabricação dos nós. Estando eles listados na tabela 5.3, com o respetivo preço para a compra de apenas uma unidade, como também o preço unitário na compra de mil unidades. Estes valores podem ser consultados na tabela 5.3, com base nos fornecedores utilizados pelo grupo.

Tabela 5-4- Preço dos componentes utilizados

Componente	Preço para uma unidade	Preço unitário, na compra de mil unidades
<i>SoC CC2530 TI</i>	8,18€	4,14€
<i>LIS331DLH ST</i>	5,59€	3,50€
<i>Saft Is17500</i>	9,1€	9,1€
<i>PCBs</i>	15€	3€
<b>Componentes diversos</b>	13€	4€



<i>Caixa Hammond 1555E</i>	8,50€	5,89€
<i>Caixa EC480C4</i>	2,33€	2€
<i>Montagem e handling</i>	8€	2€

O sistema conta com dois tipos de nós, os quais usam componentes diferentes, logo divergem também em preço. Para permitir ter visão sobre o preço unitário dos nós nesta fase inicial e num cenário de fabrico em maiores quantidades. São apresentados na tabela 5.4 os preços para fabrico de uma unidade e de mil unidades. Sendo que estes valores são aproximados e de tudo dependem do preço obtido por parte dos fornecedores.

**Tabela 5-5-Preço por dispositivo**

<b>Nó a fabricar</b>	<b>Preço de fabricação de uma unidade</b>	<b>Preço unitário fabricando mil unidades</b>
<i>End Device</i>	53,20€	25,74€
<i>Access Point</i>	38,51€	13,14€

## 5.4 Resumo

Neste capítulo, é demonstrado o sistema de deteção de colisões desenvolvido nesta tese, onde é apresentados os testes de funcionamento e os resultados dos mesmos. A estrutura onde foram efetuados os testes não é uma guarda de segurança, o qual obrigou a calibrar o sistema para a mesma. Foi comprovado o funcionamento do sistema e de todas as suas componentes. Quanto ao consumo, este pode ser melhorado, com medições mais precisas e assim possibilitar melhor controlo do consumo real. Esta solução ao nível dos custos para fabricação não são muito altos, sendo que em grande escala os valores reduzem para menos de metade.



## 6. Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões referentes ao sistema de deteção de colisões desenvolvido e ainda possíveis melhorias e trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

O sistema desenvolvido tem como finalidade a deteção de colisões com guardas de segurança. Podendo estas ser provocadas por viaturas, desmoronamento ou deslizamento de terras. Com base nos resultados obtidos no teste efetuado, o sistema cumpre integralmente todos os objetivos propostos, faltando apenas um teste de campo, o qual não foi possível executar aquando da entrega desta dissertação.

Para a análise do problema, foram efetuadas simulações das guardas de segurança, às quais foram aplicadas forças que simulam colisões. Após realização de inúmeros testes e simulações, foi possível extrair os dados pretendidos e ficar a conhecer melhor o comportamento das guardas após uma colisão.

Ao nível do *hardware* desenvolvido, o mesmo foi feito com a preocupação de ser robusto, de baixo custo e com boas características para implementar uma WSN baseada na *SimpliciTI* e com topologia de rede em estrela. Sendo que para os nós mais complicados os ED, após alguns protótipos foi criado um modelo completo para a aplicação, adaptável a duas caixas selecionadas. O nó AP, foi desenvolvido para fazer interface série com um PC desktop onde se encontra a aplicação que comunica com a base de dados, *website* e a aplicação móvel. Este nó desenvolvido cumpre com as expectativas, faltando resolver um problema técnico, sendo a passagem do cabo pela

caixa sem por o seu índice de permeabilidade em causa (*IP*). Quanto ao módulo *CC1110EM* desenvolvido, este não chegou a ser construído, ficando para trabalho futuro construir a placa e testar a mesma. Podendo assim fazer a comparação com o módulo *CC2530EM*.

Quanto à programação dos nós utilizando a *stack Simpliciti*, esta mostrou-se eficiente para a implementação da WSN e controlo dos nós para implementação da comunicação sem fios. Esta *stack* ocupa pouca memória de código, possibilitando a migração direta para os módulos *CC1110EM* no futuro. Pois este *SoC* tem limitação de memória 32KBytes. Outras *stack* concorrentes simplesmente não suportam este *SoC* devido a necessidade de mais memórias para serem implementadas. Sobre a aplicação desenvolvida para *desktop*, esta mostra-se robusta em funcionamento, possibilitando a visualização de todos os parâmetros e à gestão das WSN e dados (registos de colisões, *Keep Alives* e erros). Foram detetados alguns problemas durante os primeiros dias de testes, motivados sobretudo por falhas de comunicação devido a problemas nas ligações *wireless*, relacionadas com o alcance dos EDs.

O sistema foi testado integralmente, onde foi possível verificar o funcionamento de uma WSN composta por 4 nós (um AP, três ED) a monitorizar uma viga. Foram criados colisões de baixa intensidade na viga, para verificar a resposta do sistema a detetar as mesmas. O sistema após calibração para o teste, mostrou-se fiável, pois nenhuma colisão ficou por detetar. Foi ainda verificado um bom funcionamento entre todos os componentes do sistema e fiabilidade nas comunicações RF entre os nós da WSN. Tendo faltado um teste pratico numa guarda de segurança real. O mesmo não foi possível, ficando para trabalho futuro, sendo que pressupõe um período de teste alargado de vários meses.

Os objetivos desta tese foram cumpridos de uma forma geral, sendo que alguns pontos podem ainda ser melhoradas, as quais serão descritas na seção seguinte.

## 6.2 Trabalho futuro

Apesar do bom desenvolvimento do sistema de detecção de colisões no tempo especificado para esta tese. O mesmo pode sofrer melhorias, e introdução de novas funcionalidades. Como trabalho futuro pode-se enumerar os seguintes pontos a melhorar e a desenvolver:

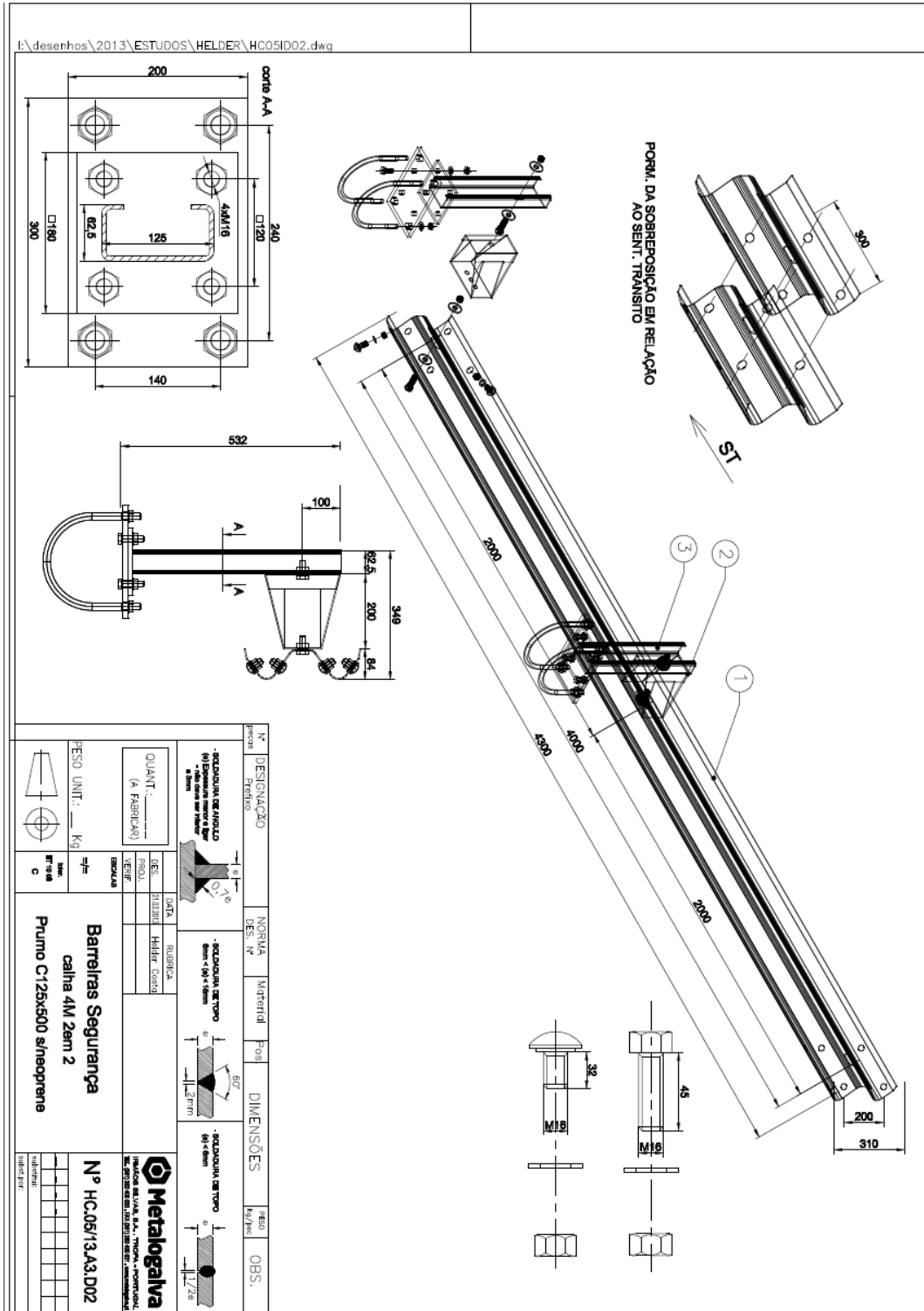
- Substituição do *hardware* do *access point* e da ligação ao PC desktop por porta série, por um novo AP, capaz de comunicar diretamente com os serviços (e indiretamente com a base de dados). Possibilitando assim mais liberdade na instalação da WSN.
- Testar o módulo *CC1110EM* desenvolvido em (§4.3.4), e comparar o desempenho com o módulo utilizado (*CC2530EM*). Sendo assim possível fazer uma comparação entre as duas bandas de frequência possíveis: 868MHz e 2.4GHz.
- Após seleção do *SoC* final a utilizar, embutir esse mesmo módulo nas *PCBs* desenvolvidas, nos nós desenvolvidos.
- Aumentar a autonomia, através do melhorando da gestão de energia e uma análise com equipamento mais preciso aos componentes do nó ED para permitir um aumento da autonomia do mesmo, sem substituir a bateria selecionada (3.5.3).
- Verificar se o código desenvolvido cumpre os *standards* de programação mais usados, para facilitar a reciclagem de código e *upgrade* ao código por parte de qualquer programador que esteja habituado a programar com esses *standards*.
- Migrar da base de dados simplificada desenvolvida para os testes, para a base de dados final desenvolvida para a empresa Ascendi.
- Efetuar testes de campo, sendo instalado o sistema nas guardas de segurança, possibilitando uma calibração real e comparar com a calibração estipulada pelas simulações. Podendo ainda verificar as interferências do trânsito e do ambiente com as comunicações e robustez do *hardware*.

- Testar os efeitos das viaturas a passarem perto e com muita velocidade junto às guardas de segurança.
- Inclusão no sistema das câmaras já existentes nas autoestradas da concessionária. As quais possibilitam, no futuro, a criação de uma ligação com o sistema proposto nesta tese, que possa fornecer em tempo real imagens das colisões detetadas. Sendo que para esse efeito, basta apenas com a hora registada pelo sistema de deteção de colisões, obter para essa mesma hora as imagens gravadas pelas câmaras próximas do local. Facilitando assim o registo das colisões, mesmo as que são de baixa intensidade, em que os veículos continuam capazes de seguir viagem.

# **Apêndices**

# Apêndice A

## Plantas das guardas de segurança “calha tipo W 4M Prumo C125”

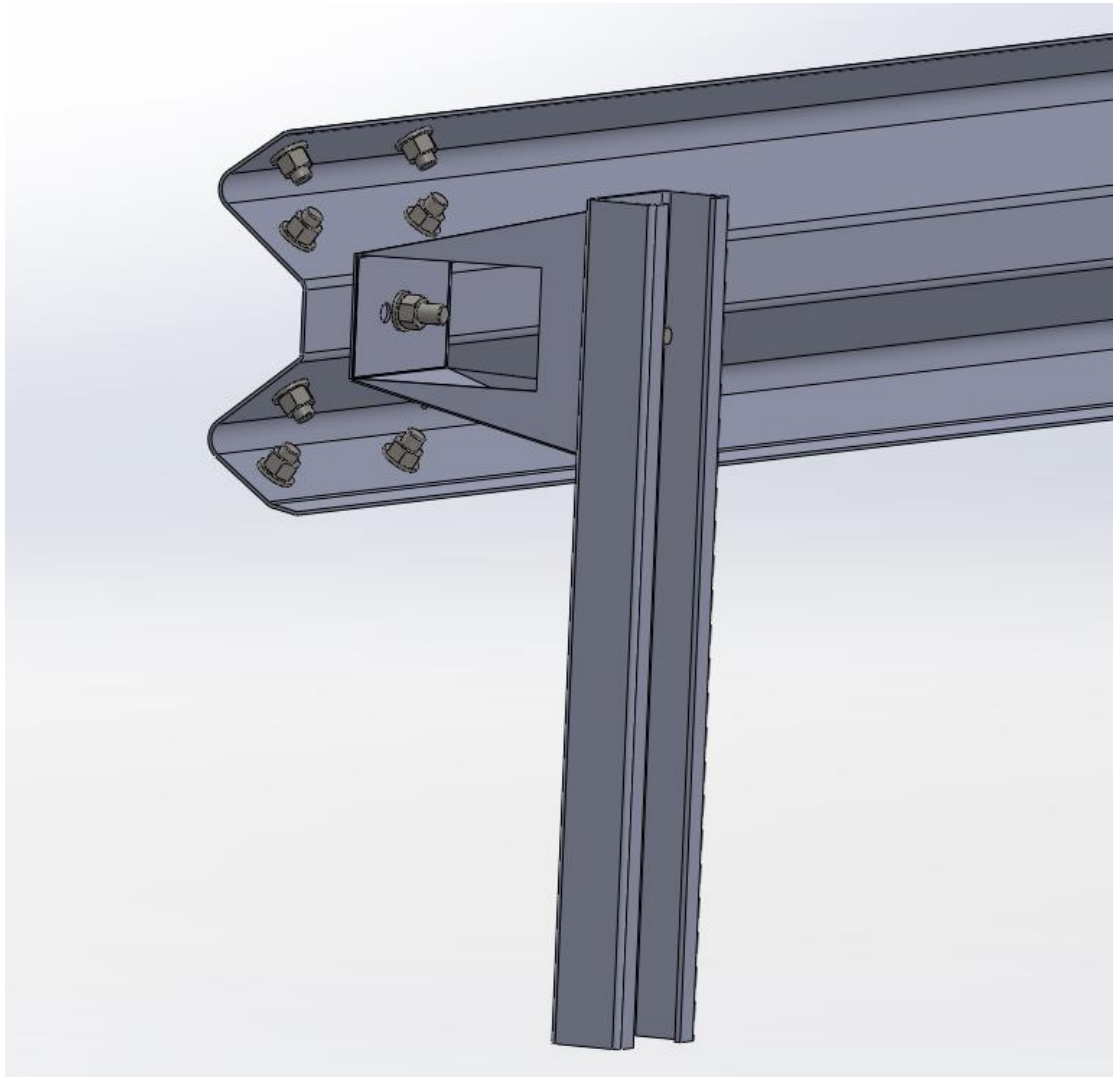




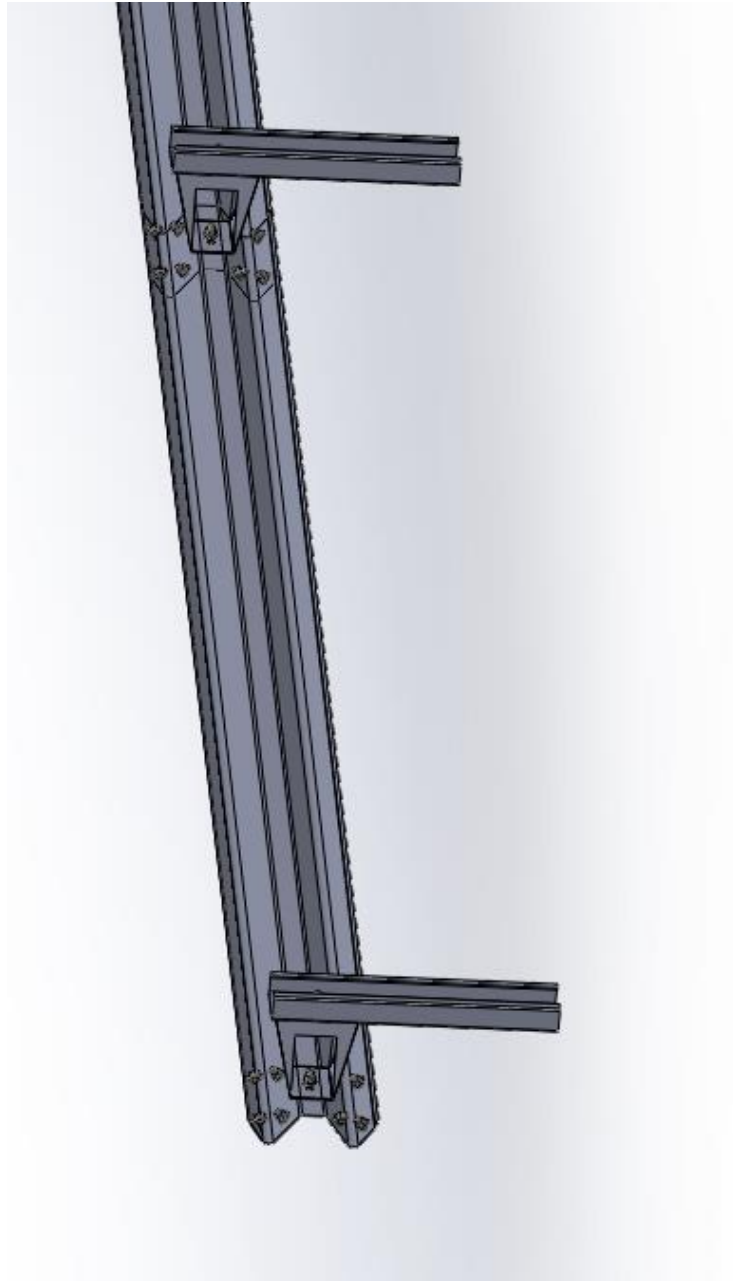
## Apêndice B

Modelo 3D em CAD das guardas de segurança.

-Prumo, amortecedor e biga em W devidamente ligados por parafusos:

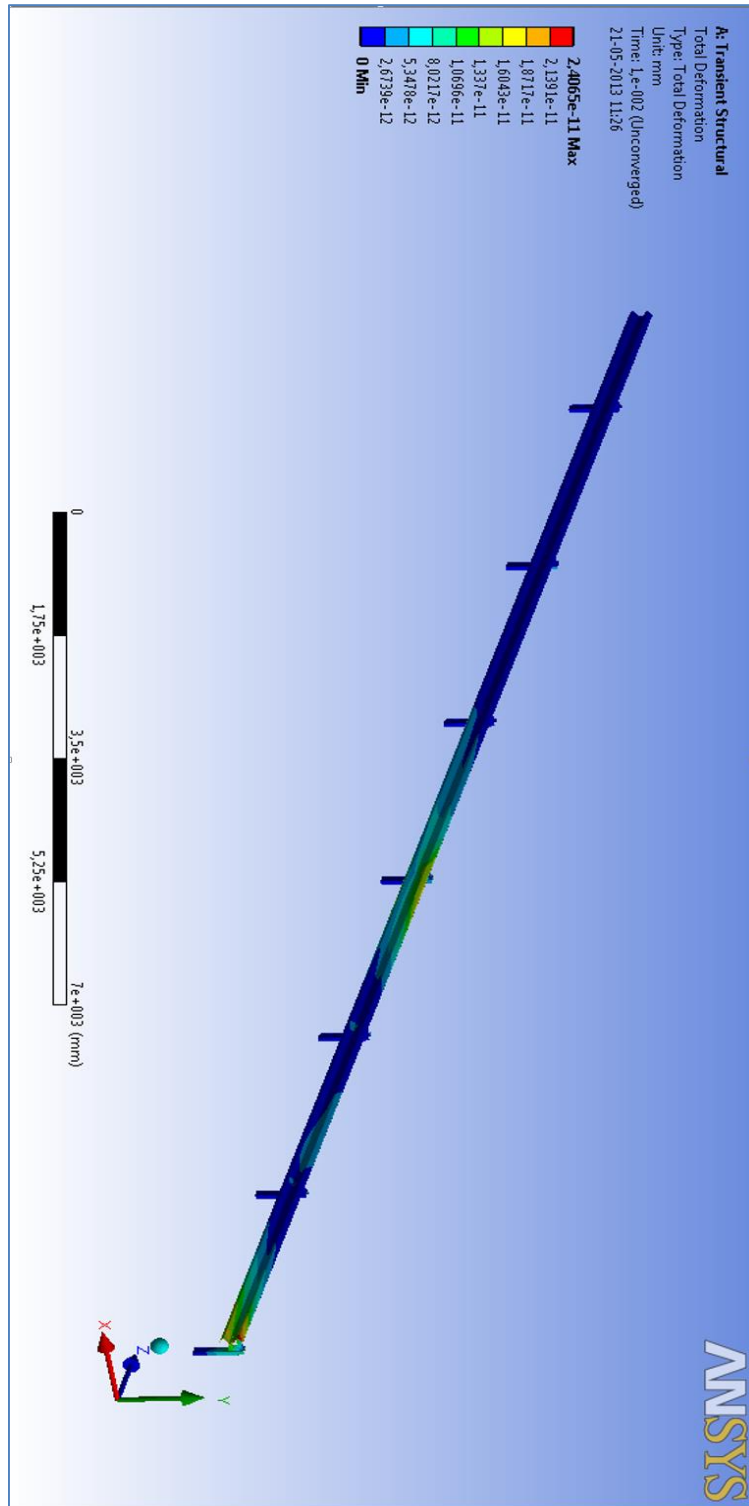


**-Sobreposição de bigas em W no ponto de ligação ao amortecedor e prumo:**



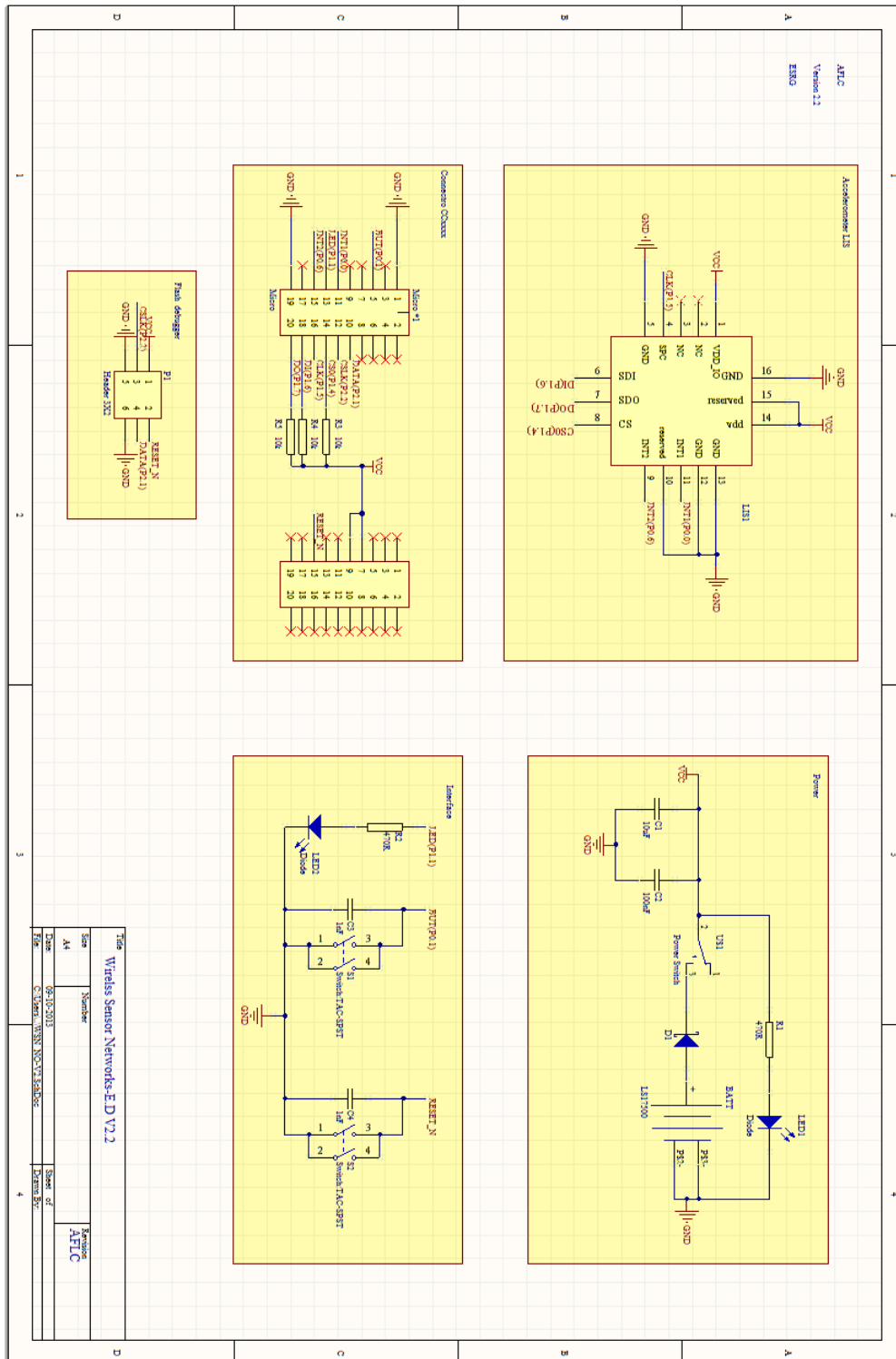
# Apêndice C

Simulação das Guardadas de Segurança em 3D na ferramenta Ansys:



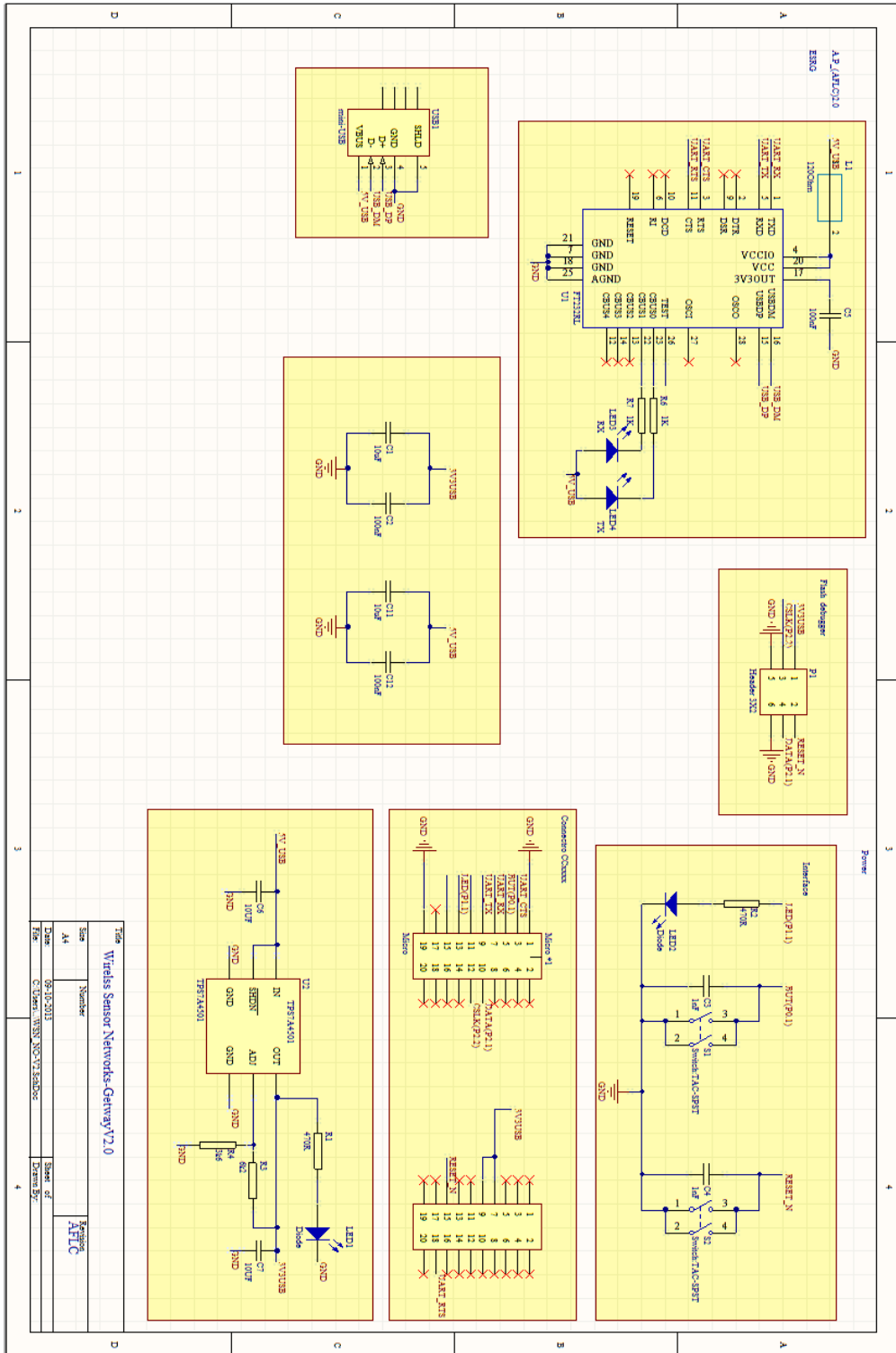
# Apêndice D

Esquemático da PCB End Device:



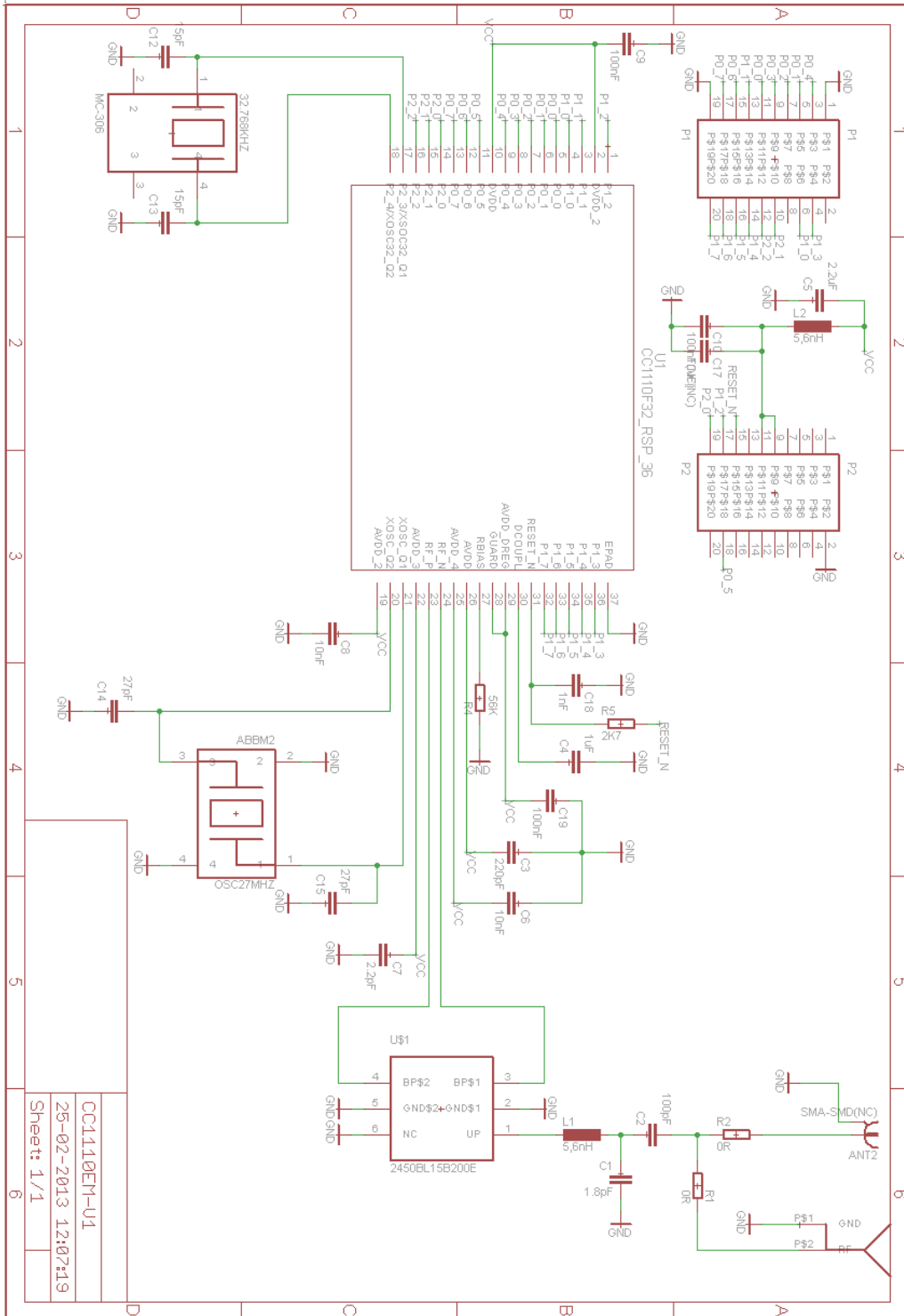
# Apêndice E

Esquemático da PCB Access Point:



# Apêndice F

## Esquemático da PCB CC110EM:



# Bibliografia

- [1] L. D. V. F. P. S. R. I. T. Pasquale Daponte, "Wireless Sensor Network for Traffic safety," em *Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2012 IEEE Workshop on*, Benevento, Italy, 2012.
- [2] V. C. M. R. I. T. Luco de Vito, "Wireless Active Guardrail System for Environmental Measurements," em *Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2012 IEEE Workshop on*, Benevento, Italy, 28-sept-2012.
- [3] X. W. L. Z. Weiyun Jiao, "Monitoring System of Car-guardrail Accident Based on Wireless Sensor Networks," *IEEE*, 2008.
- [4] S. srl, "Sistema per il Traffico," 2010. [Online]. Available: <http://www.sistrasrl.it/prodotti>.
- [5] F. C.-L. Ferreira, Levantamento Bibliográfico das tecnologias dos Acelerômetros Comerciais, UNICAMP-FEM-DMC.
- [6] A. R. G. G. S. e. R. P. Lúcia J.Figueiredo, "Aplicações de Acelerômetros," *IAS2007-Instrumentação e Aquisição de Sinais Monografia*, 19 dezembro 2007.
- [7] J. R. S. P. d. Reis, Telemidida de vibrações em estruturas e em galerias subterrâneas, Laboratório de Automação e Instrumentação Industrial-Universidade de Coimbra, 2010.
- [8] W. S. Y. S. a. E. C. I. Akyildiz, "A survey on sensor," *Communications Magazine, IEEE*, pp. Vol 40 no 8 pp 102-114, aug 2002.
- [9] I. J. W. S. Y. S. E. C. Akyildiz, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2001.
- [10] W. D. a. C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Wiley: 1st ed, 2010.
- [11] "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)," 2006. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>.
- [12] "Low-rate wireless personal area," *enabling wireless sensors with IEEE 802.15.4, 1st ed. IEEE*, 2004.

- 
- [13] "Advantech," 2011. [Online]. Available: <http://www.advantech.eu/it/edm/>.
- [14] T. Instruments, "SimpliciTI," 2012. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/simpliciti>.
- [15] C. M. d. A. Vasques, Modelização do controlo Activo de Vibrações de vigas com Sensores e Actuadores Piezoeléctricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dezembro de 2002.
- [16] Á. F.M.Azevedo, Método Dos Elementos Finitos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, abril, 2003.
- [17] i. Ansys, ANSYS-Structural Analysis Guide (Release 12.0), Canonsburg, PA-USA, April 2009.
- [18] C. B. a. W. L.Menges, "NCHRP Report 350 Test 4-12 of the Modified Thrie Beam Guardrail," PUBLICATION NO. FHWA-RD-99-065, Texas USA, December 1999.
- [19] D. B. a. W. L. M. C. Eugene Buth, "NCHRP REPORT 350 TEST 3-11 OF THE LONG-SPAN GUARDRAIL WITH 5.7M CLEAR SPAN AND NESTED W-BEAMS OVER 11.4M," TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE, texas USA, JULY 2006.
- [20] W. F. a. W. L. Roger P.Bligh, "NCHRP REPORT 350 TEST 3-11 OF THE MODIFIED T8 BRIDGE RAIL," the Texas Department of Transportation, texas USA, April 2009.
- [21] T. Instruments, "Introduction to SimpliciTI (swru130b)," texas-USA, december 2008.
- [22] J. W. H. Y. Jianhua Shi, "A Survey of Cyber-Physical Systems," em *Nanjing*, China, 2011.
- [23] G.P.Nikishkov, Introduction To The Finite element Method, Univeristy of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, 2004.
- [24] T. I. SimpliciTI, "<http://www.ti.com/tool/simpliciti>," 2012.
- [25] W. S. Y. S. a. E. C. I. Akyildiz, "Wireless sensor networks: a survey" *Computer Networks*, vol. 38 no.4, pp. 393-422, 2002.